



***Cenários de Alterações de Uso e Ocupação do
Solo até 2040 em Portugal Continental***

Sara Isabel Petronilho dos Santos

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do
grau de Mestre em Ciência e Sistemas de Informação Geográfica

Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação
da Universidade Nova de Lisboa



***Cenários de Alterações de Uso e Ocupação do
Solo até 2040 em Portugal Continental***

Sara Isabel Petronilho dos Santos

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do
grau de Mestre em Ciência e Sistemas de Informação Geográfica

Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação
da Universidade Nova de Lisboa

Cenários de Alterações de Uso e Ocupação do Solo até 2040 em Portugal Continental

Dissertação orientada por
Professor Doutor Pedro Cabral

Novembro 2014

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Pedro Cabral pela orientação, pelos conhecimentos transmitidos e por todo o apoio prestado ao longo deste trabalho.

Ao Professor Doutor Alexander Zamyatin pela colaboração essencial neste trabalho.

Ao Dr. Carlos Teles e ao Dr. Nelson Brito pela compreensão demonstrada na realização deste trabalho.

Ao Professor André Oliveira pelos comentários e enriquecedores e importantes para o desenvolvimento desta dissertação.

Aos colegas do LABNT do ISEGI pela boa disposição e companheirismo.

Ao José Diogo pela paciência e pela ajuda fundamental no decorrer deste trabalho.

Ao Daniel por me ter ajudado a rever este documento.

Aos meus pais e tia Rute por todo o apoio e disponibilidade demonstrada.

Cenários de Alterações de Uso e Ocupação do Solo até 2040 em Portugal Continental

RESUMO

Uma previsão de alterações futuras, assim como a simulação de cenários, podem sobretudo auxiliar e permitir uma antevisão de políticas de desenvolvimento de ordenamento do território. O desenvolvimento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) nesta área permite, em conjunto com modelos espaciais, a simulação de cenários alternativos de uso e ocupação do solo com base em alterações passadas. O presente estudo consiste, numa primeira parte, na previsão em termos quantitativos do uso e ocupação do solo em Portugal Continental, utilizando um modelo de Markov para os anos de 2020, 2030 e 2040, tendo como base as alterações ocorridas entre 1990 e 2000. Este modelo permite prever a mudança de forma quantitativa do uso e ocupação do solo com base nas alterações do período imediatamente anterior. Estas previsões foram feitas para todo o território continental e detalhadamente para cada uma das cinco regiões NUTS II. Numa segunda parte, o modelo espacial de simulação de alteração de uso e ocupação do solo para o ano de 2040 foi realizado com recurso a cadeias de Markov com Autómatos Celulares e com base em Regressão Logística. Foi através do modelo, baseado em Autómatos Celulares, e após validação positiva deste, que se simularam três cenários futuros: (1) cenário de sustentabilidade ambiental; (2) cenário de desenvolvimento industrial; e (3) cenário de desertificação utilizando como referência a previsão para 2040, considerando o cenário *Business-as-Usual*.

Land Use and Land Cover Change Scenarios until 2040 in Portugal Continental

ABSTRACT

The prediction of land use and land cover change scenarios may help and anticipate the definition of planning policies. The development of Geographical Information Systems (GIS) in this area enables, together with spatial models, the simulation of different land use and land cover change scenarios using historical changes. This study consists, in a 1st phase, in predict quantitatively the land use and land cover changes in Portugal continental using a Markov model for years 2020, 2030 and 2040 using the changes occurred between 1990 and 2000. This model allows to predict changes using the previous time period. The predictions were made for the whole territory of Portugal continental and also for each NUT II region. In a second phase, the spatial simulation model for year 2040 was implemented using Markov chains with cellular automata (CA_Markov) and with logistic regression. The former was used, after positive validation, to simulate 3 scenarios: (1) environmental sustainability; (2) industrial development; and (3) desertification using the business-as-usual prediction for 2040 as reference.

PALAVRAS-CHAVE

Autômatos Celulares
Cadeias de Markov
Cenários
LANDYN
Modelação Espacial
Previsão
Regressão Linear
Uso e Ocupação do Solo
Validação

KEYWORDS

Cellular Automata
Markov Chains
Scenarios
LANDYN
Spatial Modelling
Prediction
Linear Regression
Land Use Land Cover (LULC)
Validation

ACRÓNIMOS

AC - Autómatos Celulares

BAU – Business As Usual

CA – Cellular Automata

CLC – Corine Land Cover

COS – Carta de Ocupação do Solo

DGT – Direção Geral do Território

EEA - Agência Europeia do Ambiente

GEE - Gases com Efeito de Estufa

LULC – Land Use Land Cover

NUTS - Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos

PIB – Produto Interno Bruto

RL- Regressão Logística

SIG- Sistemas de Informação Geográfica

ÍNDICE DO TEXTO

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT	v
PALAVRAS-CHAVE	vi
KEYWORDS	vi
ACRÓNIMOS	vii
ÍNDICE DE TABELAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	4
1.2. Objetivos.....	5
1.3. Metodologia geral.....	6
1.4. Organização	8
2. DADOS E MÉTODOS	10
2.1. Dados	10
2.1.1. Reclassificação da nomenclatura.....	11
2.2. Métodos.....	14
2.2.1. Aplicação de Cadeias de Markov no Processo de Alteração de Uso e Ocupação do Solo	14
2.2.1.1. MARKOV	19
2.2.2. Modelos Espaciais Dinâmicos.....	21
2.2.2.1. Autômatos Celulares	22
2.2.2.2. AC e Uso e ocupação do solo.....	24
2.2.2.3. Cadeias de Markov e Autômatos Celulares.....	25
2.2.2.4. CA_MARKOV	26
2.2.3. Modelo de Regressão Logística.....	31
2.2.3.1. LOGISTICREG	33

2.2.4.	Validação.....	34
3.	RESULTADOS	37
3.1.	Projeção não espacial de uso e ocupação do Solo para 2040.....	37
3.1.1.	Análise das Alterações de uso e ocupação do solo	46
3.1.2.	Análise do Período 1990-2040.....	46
3.1.3.	Análise Período 1980-2040.....	47
3.1.4.	Análise NUTS II.....	47
3.2.	Projeção espacial de uso e ocupação do solo para 2040	49
3.3.	Cenários	51
3.3.1.	Cenário de Sustentabilidade Ambiental	56
3.3.2.	Cenário de Desenvolvimento Industrial	58
3.3.3.	Cenário de Desertificação	60
4.	CONCLUSÕES	62
4.1.	Desenvolvimentos Futuros.....	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Nomenclatura utilizada no projeto	13
Tabela 2- Tabela de contingência de 1990-2000 (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas).....	16
Tabela 3 - Tabela de contingência de 2000-2006 (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas).....	16
Tabela 4 - Tabela de contingência de 1990-2006 (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas).....	17
Tabela 5 - Tabela de contingência de 1980-1995 (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas).....	17
Tabela 6 - Tabela de contingência de 1995-2010 (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas).....	18
Tabela 7- Tabela de contingência de 1980-2010 (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas).....	18
Tabela 8 - Mudanças ocorridas – Dados CLC	38
Tabela 9 - Gráfico de Mudanças - Dados Unidades Amostras LANDYN	40
Tabela 10 – Previsões para 2020 – dados Unidades Amostras LANDYN (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)	42
Tabela 11 - Previsões para 2030 – dados Unidades Amostras LANDYN (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)	43
Tabela 12- Previsões para 2040 – dados Unidades Amostras LANDYN (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)	43
Tabela 13- Previsões para 2020 – dados CLC (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas).....	44
Tabela 14 - Previsões para 2030 – dados CLC (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas).....	44
Tabela 15 - Previsões para 2040 – dados CLC (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas).....	45

Tabela 16 - Valor de χ^2 para as NUTS II.....	45
Tabela 17- Resultados dos valores das componentes do Modelo de Validação.....	50
Tabela 18 - Proporção de cada classe.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Organograma da metodologia utilizada.....	7
Figura 2 - Área de estudo e respectivas unidades amostrais LANDYN.....	10
Figura 3- Dados utilizados para a previsão com cadeias de Markov, dados CLC	20
Figura 4- Dados utilizados para a previsão com cadeias de Markov, unidades amostrais LANDYN.....	20
Figura 5- Diferentes configurações da vizinhança AC	26
Figura 6- Mapa previsto para 2010 com CA_MARKOV	28
Figura 7 – Previsões para 2020, 2030 e 2040	29
Figura 8 - Processo CA_MARKOV	31
Figura 9 - Metodologia utilizada para o modelo de regressão logística	34
Figura 10 - Gráficos de Ganho e Perdas entre classes para os períodos 1990-2000, 2000-2006 e 1990-2006 (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)	39
Figura 11 - Gráfico de Ganho e Perdas entre classes para os períodos 1980-1995, 1995-2010 e 1980-2010 (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)	41
Figura 12 - Alterações de Uso e Ocupação do solo entre 1990 a 2040.....	46
Figura 13- Alterações de Uso e Ocupação do solo entre 1980 a 2040.....	47
Figura 14- Alterações de Uso e Ocupação do Solo nas NUTS II.....	48
Figura 15 - Mapa de previsão para 2040	52
Figura 16 - Alteração do Cenário Sustentabilidade Ambiental relativamente ao mapa de referência	54
Figura 17 - Alteração do Cenário Desenvolvimento Industrial relativamente ao mapa de referência	54
Figura 18 - Alteração do Cenário de Desertificação relativamente ao mapa de referência ..	55
Figura 19- Cenário de Sustentabilidade Ambiental	57
Figura 20- Cenário Desenvolvimento Industrial.....	59
Figura 21- Cenário de Desertificação	61

1. INTRODUÇÃO

A cartografia de ocupação/uso do solo é importante, uma vez que fornece informação detalhada acerca das características físicas que qualificam um determinado território.

As mudanças de uso e ocupação do solo têm provado ser um fenómeno com impactos significativos no ambiente, na economia, na saúde, na qualidade de vida das pessoas e também um aspeto importante para os estudos do aquecimento global, uma vez que existe uma interação entre o clima, os processos do ecossistema, a biodiversidade e as atividades humanas (Arsanjani et al. 2011), ao nível global, nacional e regional. Tendo em conta o impacto que este tema tem nas diferentes áreas, não sendo um tema que se possa manipular facilmente, é importante tentar prever as várias visões, quer a nível espacial, quer a nível temporal a que possamos estar sujeitos.

Uma das consequências mais notáveis do desenvolvimento das atividades humanas é a mudança no uso do solo. O crescimento das cidades e o estabelecimento de áreas de cultivo em áreas naturais, onde não existiam anteriormente qualquer uso, são ambos exemplos muito representativos dessa mudança. Para tal é importante a previsão de cenários futuros, que forneçam informação para estudos relacionados com alterações climáticas (Comarazamy et al. 2013; Liang 2010; Xiong 2014).

De acordo com Walker (1999), as mudanças de uso e ocupação do solo provocam efeitos profundos na estrutura e funcionamento dos ecossistemas terrestres. Assim, os estudos das mudanças no uso e ocupação do solo, surgem como um contributo essencial na compreensão e gestão das dinâmicas socioeconómicas e nas dimensões político-institucionais atuantes no espaço (Nunes 2002).

Se analisarmos em detalhe todos os processos de uso e ocupação do solo até aos dias de hoje, podemos verificar que as classes de uso do solo têm oscilado, de século para século e que sempre existiram preocupações para chegar a um equilíbrio no âmbito das classes de uso do solo.

Existem diferentes estudos que se debruçam sobre a temática das mudanças no uso e ocupação do solo, uma das várias técnicas utilizadas para a análise e previsão futura são as cadeias de Markov. Estudos como os de Turner (1987) que comparou os resultados de um modelo de cadeias de Markov com outros modelos de simulação espacial, para projetar alterações na ocupação do solo na Geórgia. Muller e Middleton (1994), usaram cadeias de Markov de primeira ordem para investigarem a dinâmica das alterações do uso do solo em Niágara, Canadá, entre 1935 e 1981. Iacono et al. (2012) usaram um modelo de Markov com dados de uso e ocupação do solo entre 1958 e 2005, para estimar a fração de solo

disponível para os transportes em Mineápolis, EUA. Chen et al. (2013) investigaram e projetaram no futuro, com recurso a cadeias de Markov, as alterações do uso do solo na floresta de mangal hondurenha a partir de imagens de satélite Landsat, obtidas entre 1985 e 2013. Contudo, as cadeias de Markov não incorporam a autocorrelação espacial¹ para prever alterações futuras. Assim, foi necessário incorporar uma componente espacial para a previsão das alterações futuras. Neste estudo utilizaram-se dois modelos comparativos: (1) Cadeias de Markov em conjunto com Autómatos Celulares (AC) e (2) Regressão Logística (RL).

O conceito de AC foi utilizado pela primeira vez por Von Neumann (Von Neumann 1966). Os AC permitem simular as características espaço-temporais de sistemas complexos e têm sido amplamente utilizados na simulação de cenários de uso e ocupação de solo (Ye e Bai 2008). A utilização de AC no estudo do uso e ocupação do solo, conhece um desenvolvimento rápido devido à integração de simples regras de adjacência espacial que influenciam a dinâmica de uso do solo (Tenedório et al. 2006). São vários os estudos que usaram cadeias de Markov em conjunto com AC, para prever as alterações de uso e ocupação do solo. Yang et al. (2012), propuseram um modelo de simulação com base em índices de paisagem, cadeias de Markov e AC. O modelo foi aplicado com sucesso em Changping, distrito de Pequim. Arsanjani et al. (2011), usaram AC em conjunto com cadeias de Markov para modelarem a expansão urbana ocorrida na periferia de Teerão no Irão. Ye e Bai (2008) previram o uso e ocupação do solo para 2015 na região de Nenjiang, China, utilizando modelos AC com cadeias de Markov. Terra e Silva (2012) utilizaram cadeias de Markov juntamente com AC, para simular a diminuição de floresta da bacia do alto rio Paraguai para os anos de 2022 e 2050. Cabral e Zamyatin (2009) avaliaram, a partir de imagens de satélite Landsat, a influência no Parque Natural de Sintra-Cascais a dinâmica de uso e ocupação do solo nos concelhos de Sintra e Cascais em Portugal, entre 1989 e 2000 com recurso a cadeias de Markov. Estes autores concluíram que as cadeias de Markov são boas ferramentas para descrever e projetar quantitativamente as alterações de uso e ocupação do solo. No entanto, e uma vez que incorporam a componente espacial, sugerem a utilização de cadeias de Markov em conjunto com modelos espaciais, como os AC, para prever alterações futuras.

Para além dos modelos cadeias de Markov e AC, existem também diversos estudos para a previsão de mudança de uso e ocupação do solo utilizando Regressão Logística. Dendoncker (2006) utilizou métodos de RL, tendo como base as cartas Corine Land Cover de 1990 para obter cenários futuros para 2020, numa pequena área da Bélgica. Hu (2007)

¹Autocorrelação espacial é a dependência dos valores de uma variável em locais geográficos específicos sobre os valores da variável em locais vizinhos (Rosenberg 2000). Uma variável apresenta autocorrelação espacial a previsão do seu valor depende do valor das células adjacentes.

aplicou o mesmo método para modelar o crescimento urbano na área metropolitana da Geórgia em Atlanta, Gao e Zhang (2012) desenvolveram um modelo baseado em RL para o Mt. Qomolangma (Everest) National Nature Preserve na China e Abdel-Kader (2011) também usou a RL para a previsão da distribuição das várias classes do solo na costa noroeste Egípcia. Wu e Yeh (1997) tiveram em conta fatores de mudança de uso do solo em Guangzhou - China e usaram RL para representar a transição entre uso do solo, não urbano e urbano. O modelo de RL simples sofre de algumas limitações, sobretudo no que diz respeito à determinação do intervalo temporal, uma vez que este modelo, não é temporalmente explícito i.e., produz um mapa de probabilidades que indica em que espaço físico houve mudança, mas não em que espaço temporal (Hu 2007).

Arsanjani et al. (2011), analisaram a expansão urbana na área de Teerão no Irão e desenvolveram um modelo híbrido composto por RL, cadeias de Markov e AC. Para estes autores, ainda que o modelo de RL tenha as suas limitações no que diz respeito às mudanças temporais, a associação entre cadeias de Markov e AC vem colmatar essa limitação.

No entendimento que o futuro se enforma da interação entre a sociedade e o meio, o processo de definição de cenário futuro, passa por um lado, pela identificação de vários fatores que influenciam as várias mudanças a que o meio está sujeito e por outro lado a identificação das expectativas dos que contribuem diretamente para a sua construção (Ramos 2009).

A simulação de cenários, é um complemento importante para a gestão do território, pois não é fácil definir estratégias futuras com base num futuro incerto. A criação de exemplos hipotéticos, permite dar uma resposta com base em dados que poderão simular futuros prováveis, ajudando assim a planear tendo em conta algumas hipóteses.

Erlie (2006), desenvolveu um modelo de simulação de uso e ocupação do solo, para o norte da Amazônia Equatoriana, onde utilizou AC e modelo baseado em agentes², para que educadores, alunos e gestores de planeamento e ordenamento do território pudessem discutir sobre a temática e definir estratégias futuras, num contexto de sala de aula, de forma a tentar obter resultados possíveis de serem aplicados num contexto prático. Outro estudo de simulação para a Amazônia Equatoriana, foi desenvolvido por Messina (2001), que simulou as mudanças ocorridas em algumas classes de uso e ocupação do solo, para o ano de 2010. O modelo utilizado tinha como base AC. Em 2002, (Soares – Filho) desenvolveu o modelo de simulação - DINAMICA – utilizando AC, para simular padrões espaciais de ocupação do solo na zona norte de Mato Grosso no Brasil.

² Modelo Baseado em Agentes consiste num sistema computacional que simula as ações de várias entidades autónomas, com características únicas que interagem entre si e que definem as relações entre os agentes e o seu ambiente dinâmico (Erlie 2006).

1.1. Enquadramento

Portugal Continental tem sofrido alterações significativas ao nível do uso e ocupação do solo. Portugal tem-se centrado particularmente em dois estudos cartográficos: (1) Cartas de Ocupação do Solo (COS), a Carta de Uso e Ocupação do solo (COS) é uma cartografia temática que pretende caracterizar o uso e ocupação do solo em Portugal Continental. Existem duas coberturas COS'90, e a COS'2007 e nas (2) Cartas Corine Land Cover (CLC), o programa Corine (CO –Ordination of Information) on the Environment foi criado em 1985 pela União Europeia com o objetivo de desenvolver um sistema de informação - sistema Corine, sobre o estado do ambiente a nível europeu (Caetano et al. 2005).

Em Portugal continental existem atualmente três edições: CLC90, produzida com base em imagens satélites de 1985/86/87, CLC2000 (Painho e Caetano 2006) e CLC2006 (Caetano et al. 2009)

Com o intento de atualizar o conhecimento sobre as mudanças de uso e ocupação do solo, surge o Projeto LANDYN³.

A presente dissertação foi realizada no âmbito do projeto de alterações de Uso do Solo em Portugal Continental - Projeto LANDYN, que pretende construir informação relevante para ser utilizada em diversos campos de aplicação, incluindo as alterações climáticas, bem como para organizações, decisores, investigadores e cidadãos.

O projeto centraliza a sua estratégia na análise da ocupação/uso do solo, em três momentos distintos (1980,1995, 2010), permitindo obter uma visão original e única sobre as alterações passadas, presentes e futuras de uso/ocupação do solo (em inglês LULC- *Land Use Land Cover*) em Portugal Continental.

O projeto LANDYN tem como objetivos principais:

- (1) Proporcionar uma boa compreensão das alterações de uso e ocupação do solo;
- (2) Identificar e compreender as principais forças motrizes dessas alterações;
- (3) Construir os principais cenários de alterações de LULC até 2040, usando um modelo espacial; e

³ Projeto LANDYN- Alterações de uso e ocupação do solo em Portugal Continental: caracterização, forças motrizes e cenários futuros", projeto financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT). [Http://landyn.isegi.unl.pt/](http://landyn.isegi.unl.pt/)

(4) Usar toda esta informação para o estudo da procura de energia e das emissões e remoções de gases com efeito de estufa (GEE).

Esta dissertação, refere-se à tarefa 4 - Modelação de cenários futuros para a ocupação/uso do solo para Portugal Continental, que consiste na construção de um modelo para a determinação de LULC até ao ano de 2040 para Portugal Continental, com base no desenvolvimento de cenários exploratórios.

O projeto LANDYN pretendeu caracterizar as alterações de uso e ocupação do solo para uma área de grandes dimensões adotando para isso, uma estratégia baseada em amostragem probabilística espacial para estimar as alterações de uso e ocupação do solo. Utilizou mapas base de uso e ocupação do solo derivados de fotografia aérea através de interpretação visual.

Com este projeto identificaram-se forças motrizes de alterações de uso e ocupação do solo em Portugal Continental, utilizando técnicas de *data mining* (especificamente o *self-organising map*) para lidar com o aspeto hiperdimensional dos conjuntos de dados envolvidos.

No entanto, uma das novidades do projeto foi o desenvolvimento do modelo espacial de alterações de uso e ocupação do solo, (modelo que será apresentado e descrito ao longo desta dissertação) combinando cadeias de Markov e AC para a simulação de cenários futuros, baseados em dados anteriores de uso e ocupação do solo.

Este modelo será muito importante para a compreensão das forças motrizes, incluindo políticas responsáveis pelas alterações de uso e ocupação do solo.

O Projeto LANDYN contribui ainda de forma inovadora para a estimação da procura de energia e das emissões e remoções de Gases com Efeito de Estufa (GEE) a partir de 1950, tendo como base as orientações específicas dos órgãos competentes, quer a nível nacional, quer a nível internacional (DGT 2013).

1.2. Objetivos

O presente estudo tem como principal objetivo a elaboração de um modelo espacial de simulação de cenários para o ano de 2040 em Portugal Continental, de forma a poderem antecipar-se estratégias ao nível do uso e ocupação do solo.

Em termos de objetivos gerais, pretende-se que este estudo preveja as alterações de uso e ocupação do solo com base nos dados (CLC), CLC90, CLC00 e CLC06 para Portugal Continental e, detalhadamente, para cada uma das cinco regiões, Nomenclatura das

Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS II)⁴, (Norte, Centro, Lisboa, Alentejo e Algarve) para os anos de 2020, 2030 e 2040. Assim, um dos objetivos deste estudo é verificar se o uso e ocupação do solo em Portugal Continental, depende das alterações ocorridas em períodos imediatamente anteriores. A ser provada esta hipótese, torna-se legítima a projeção de alterações futuras de uso e ocupação do solo com base em cadeias de Markov, pressupondo que as alterações ocorridas são estacionárias ao longo do tempo. A informação quantitativa resultante deste estudo, permite antecipar a tendência geral futura de uso e ocupação do solo podendo ser útil para a gestão e planeamento do território.

É com base em cadeias de Markov e nas previsões para 2040, que se simulará cenários hipotéticos utilizando um modelo espacial (Pontius e Malanson 2005; Tewolde e Cabral 2011; Martins et al. 2012) uma vez, que as cadeias de Markov por si só não contêm a componente espacial, de forma a garantir a espacialidade da simulação com instrumentos de planeamento, políticas e gestão territorial (Cabral e Zamyatin 2009).

São ainda objetivos deste projeto:

- Comparar os modelos espaciais de forma a verificar qual dos modelos se adequa melhor na simulação de cenários futuros;
- Sugerir estratégias futuras, tendo em conta os resultados das simulações obtidas.

1.3. Metodologia geral

A figura 1 mostra o esquema que retrata todo o processo utilizado para chegar ao objetivo principal desta dissertação, a elaboração de um modelo espacial de simulação de cenários para o ano de 2040 em Portugal Continental.

⁴ Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos NUTS II, ao nível de Portugal continental fazem parte das NUTS II, cinco unidades (Norte, Centro, Lisboa, Alentejo e Algarve), de acordo com o anexo I do Decreto-Lei n.º 244/2002 de 5 de novembro

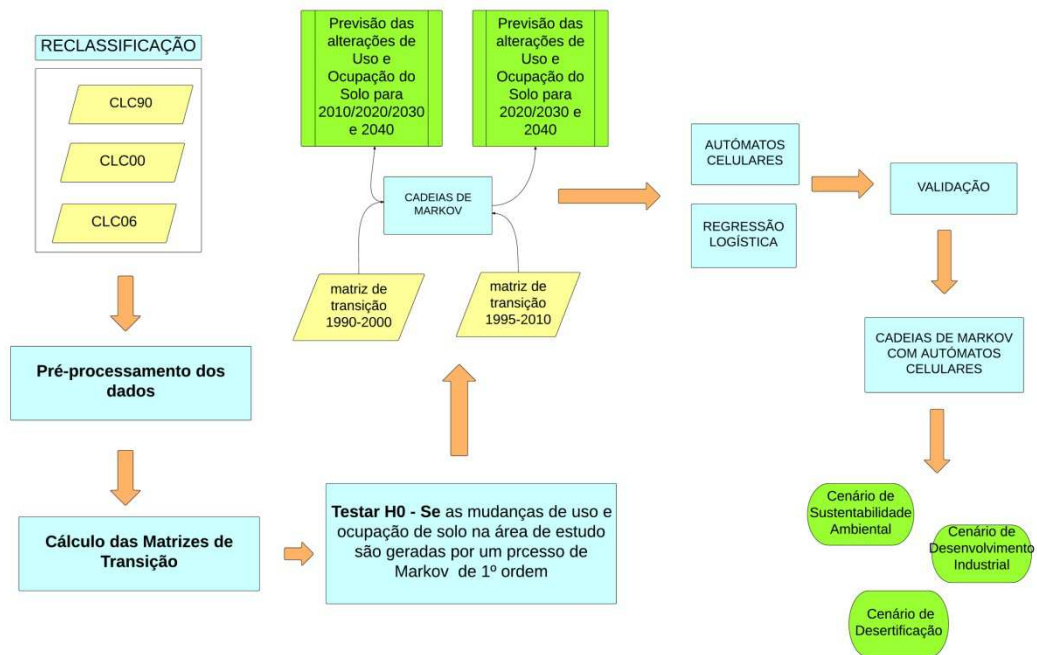


Figura 1 - Organograma da metodologia utilizada

A reclassificação foi o primeiro método a ser utilizado, uma vez que as classes utilizadas nas cartas CLC não estavam em conformidade com as utilizadas no projeto LANDYDYN. O pré-processamento dos dados consistiu na conversão dos dados amostrais, em formato *shapefile* da ESRI (ESRI 2013) para um formato matricial (tif), com a resolução espacial de 100m e importados para o software IDRISI SELVA (Clark Labs 2013). Posteriormente, foram obtidas as matrizes de transição de uso e ocupação do solo para os períodos de 1980 a 1995, de 1995 a 2010 e de 1980 a 2010, com os dados LANDYDYN e de 1990 a 2000, 2000 a 2006 e 1990 a 2006 com os dados CLC. Em seguida, foi testada a hipótese de que as mudanças de uso e ocupação de solo na área de estudo são geradas por um processo de Markov de primeira ordem. Após ter-se aferido que as mudanças de uso e ocupação do solo, dependiam das alterações do período imediatamente anterior, i.e., seguiam um processo markoviano, foi possível estimar as alterações de uso e ocupação do solo para 2020, 2030 e 2040, utilizando as duas fontes de dados.

Uma vez que as cadeias de Markov não contemplam a componente espacial, foi necessário testar qual seria o melhor modelo espacial para concluir o objetivo final, operacionalizando-se paralelamente modelos com AC e RL. Após a validação dos dois modelos, concluiu-se que a melhor opção seria a combinação de cadeias de Markov com AC. Desta forma, foi este o modelo que se utilizou para a simulação dos três cenários apresentados para o ano de 2040.

Na elaboração deste estudo utilizaram-se os programas IDRISI SELVA (Clark Labs 2013) e ArcGIS da ESRI (ESRI 2013). O cálculo das matrizes de contingência foi efetuado com auxílio do comando CROSSTAB do IDRISI SELVA. Este cálculo foi utilizado para testar a hipótese de que o uso e ocupação do solo na área de estudo seria um processo de Markov. Após a confirmação, previram-se as mudanças de uso e ocupação do solo com o comando MARKOV. O Modelo CA_MARKOV, LOGISTICREG e VALIDATE foram executados também pelo software IDRISI SELVA (Clark Labs 2013). A conversão de vetorial para *raster* e a elaboração dos mapas finais, foram efetuados com recurso ao programa ArcGIS da ESRI (ESRI 2013).

1.4. Organização

No primeiro capítulo, apresenta-se uma parte introdutória dos elementos essenciais do projeto e a sua importância, o enquadramento para o tema escolhido, os objetivos e a metodologia utilizada.

No capítulo 2, são identificados os dados e a metodologia utilizada. Neste capítulo, após a apresentação dos dados utilizados no estudo, é demonstrada a reclassificação da nomenclatura das classes de uso e ocupação do solo, de forma a uniformizar as classes de acordo com as classes utilizadas em tarefas anteriores do Projeto LANDYN. É aqui que se faz a abordagem à modelação e se inclui o teste à hipótese de que as mudanças de uso e ocupação de solo na área de estudo são geradas por um processo de Markov de primeira ordem, para o período em análise. No capítulo 2, demonstra-se todo o processo para prever as alterações de uso e ocupação do solo na área de estudo para anos futuros com base em anos anteriores, utilizando uma componente espacial. Ainda no mesmo capítulo, são descritas as metodologias utilizando AC e RL, a validação dos modelos e por fim o modelo utilizado para a simulação dos cenários para 2040.

No capítulo 3, é onde os resultados são apresentados e analisados. Inicialmente, demonstra-se que neste estudo estamos perante um processo markoviano de primeira ordem, sendo assim possível prever as mudanças de uso e ocupação do solo para anos posteriores. São ainda demonstradas e analisadas as mudanças que ocorreram e que poderão ocorrer no período em estudo e nos períodos para os quais essas mudanças são previstas. Neste capítulo, confirma-se o resultado da validação e o porquê da escolha do modelo de cadeias de Markov com AC para a simulação dos cenários. É ainda neste capítulo que se apresentam e se analisam os cenários simulados.

O quarto e último capítulo engloba a apreciação geral dos resultados e os desenvolvimentos futuros, bem como algumas limitações existentes no projeto.

2. DADOS E MÉTODOS

2.1. Dados

O projeto LANDYN abrange Portugal Continental (Figura 2). No âmbito deste projeto, foram criadas unidades amostrais para as décadas de 1980, 1995 e 2010, distribuídas de forma aleatória no território e correspondendo a 499596 hectares, cerca de 6% da área total de Portugal Continental. Os dados utilizados foram disponibilizados pela Direção Geral do Território (DGT), que utilizou uma amostragem por *clusters* constituídos por 2 x 2 elementos da grelha de referência, i.e., elementos com 4 Km². Esta grelha é constituída por 1279 unidades amostrais, distribuídas pelo território continental (DGT 2013). Na malha de amostragem, foi adotada a grelha de referência de 1 x 1 km² (ETRS89-LAEA 52N 10E) da Agência Europeia do Ambiente (EEA) (DGT 2013).

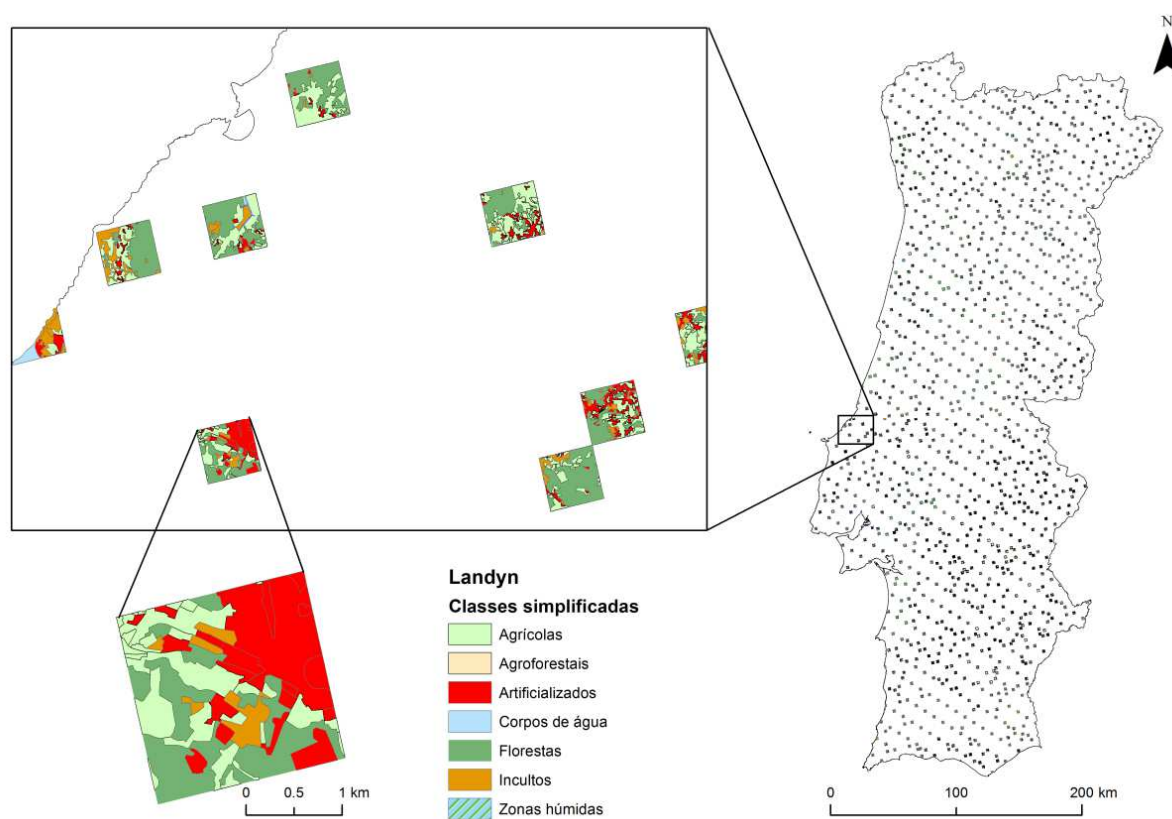


Figura 2 - Área de estudo e respetivas unidades amostrais LANDYN

2.1.1. Reclassificação da nomenclatura

As classes utilizadas nesta dissertação foram as classes reclassificadas no projeto LANDYN, tendo como ponto de partida as classes da COS2007, que se organiza em cinco níveis hierárquicos. Foram assim obtidas 32 classes, as quais são mencionadas nesta dissertação como classes LANDYN (Tabela 1).

Para este projeto utilizaram-se 7 classes, designadas como classes simplificadas, também mencionadas no projeto LANDYN, permitindo uma maior simplificação de todo o procedimento. Na utilização das cartas CLC, reclassificou-se a nomenclatura de acordo com as classes LANDYN (32 classes), contudo por uma questão de coerência utilizaram-se as classes simplificadas no desenvolvimento do projeto, como verificado na tabela 1. A classe CLC 29 - Florestas abertas, cortes e novas plantações, corresponde a quatro classes L24 - Outras formações lenhosas; Cortes e novas plantações; Viveiros florestais; Aceiros e/ou corta-fogos, L27 - Florestas abertas de folhosas (excluindo o eucalipto e espécies invasoras), L28- Florestas abertas de resinosas, L29- Florestas abertas de eucalipto e espécies invasoras (Tabela 1).

Classe Simplificada	Classe LANDYN		Designação CLC (Corine Land Cover)	
Agrícolas	L10	Culturas temporárias de sequeiro	CLC12	Culturas temporárias de sequeiro
	L11	Culturas temporárias de regadio	CLC13	Culturas temporárias de regadio
	L12	Arrozais	CLC14	Arrozais
	L13	Vinhas	CLC15	Vinhas
	L14	Pomares	CLC16	Pomares
	L15	Olivais	CLC17	Olivais
	L16	Pastagens permanentes	CLC18	Pastagens permanentes
	L17	Áreas agrícolas heterogêneas	CLC19	Culturas temporárias e/ou pastagens associadas a culturas permanentes
			CLC20	Sistemas culturais e parcelares complexos
			CLC21	Agricultura com espaços naturais e semi-naturais

Agroflorestais	L18	Sistemas agro-florestais	CLC22	Sistemas agro-florestais
Artificializados	L1	Tecido urbano contínuo	CLC1	Tecido urbano contínuo
	L2	Tecido urbano descontínuo	CLC2	Tecido urbano descontínuo
			CLC10	Espaços verdes urbanos
	L3	Indústria, comércio e equipamentos gerais	CLC3	Indústria, comércio e equipamentos gerais
	L4	Redes viárias e ferroviárias e espaços associados	CLC4	Redes viárias e ferroviárias e espaços associados
	L5	Áreas portuárias	CLC5	Áreas portuárias
	L6	Aeroportos e aeródromos	CLC6	Aeroportos e aeródromos
	L7	Áreas de extracção de inertes	CLC7	Áreas de extracção de inertes
	L8	Áreas de deposição de resíduos	CLC8	Áreas de deposição de resíduos
	L9	Áreas em construção	CLC9	Áreas em construção
Corpos de águas	L32	Campos de Golfe		Equipamentos desportivos, culturais e de lazer e zonas históricas
			CLC11	
			CLC40	Cursos de água
			CLC41	Planos de água
			CLC42	Lagoas costeiras
Florestas	L31	Corpos de águas	CLC43	Desembocaduras fluviais
			CLC44	Oceano
	L19	Florestas de folhosas (excluindo o eucalipto e espécies invasoras)	CLC23	Florestas de folhosas
	L20	Florestas de resinosas	CLC24	Florestas de resinosas
	L21	Florestas de eucalipto e espécies invasoras	CLC25	Florestas mistas
	L24	Outras formações lenhosas; Cortes e novas plantações; Viveiros florestais; Aceiros e/ou corta-	CLC29	Florestas abertas, cortes e novas plantações

		fogos		
	L27	Florestas abertas de folhosas (excluindo o eucalipto e espécies invasoras)		
	L28	Florestas abertas de resinosas		
	L29	Florestas abertas de eucalipto e espécies invasoras		
Incultos	L22	Vegetação herbácea natural	CLC26	Vegetação herbácea natural
	L23	Matos	CLC27	Matos
			CLC28	Vegetação esclerófila
	L25	Zonas descobertas e com pouca vegetação	CLC30	Praias, dunas e areais
			CLC31	Rocha nua
			CLC32	Vegetação esparsa
			CLC34	Neves eternas e glaciares
	L26	Áreas ardidas	CLC33	Áreas ardidas
Zonas húmidas	L30	Zonas húmidas	CLC35	Paúis
			CLC36	Turfeiras
			CLC37	Sapais
			CLC38	Salinas e aquicultura litoral
			CLC39	Zonas entre-marés

Tabela 1 – Nomenclatura utilizada no projeto

2.2. Métodos

2.2.1. Aplicação de Cadeias de Markov no Processo de Alteração de Uso e Ocupação do Solo

A análise da cadeia de Markov, descreve a probabilidade de mudança da cobertura da terra a partir de um período para outro, através do desenvolvimento de uma matriz de probabilidade de transição entre t_1 e t_2 . As probabilidades podem ser precisas por categoria, mas não há conhecimento da distribuição espacial das ocorrências dentro de cada classe de cobertura do solo (Eastman 2003).

Os processos estocásticos geram sequências de variáveis aleatórias $\{X_n, n \in T\}$ através de leis probabilísticas. Neste trabalho, o índice n representa o tempo. O processo é considerado discreto no tempo e $T = \{0, 5, 10 \dots\}$ anos aproximadamente, o que constitui uma unidade temporal razoável para estudar processo de alteração de uso e ocupação do solo. Se o processo estocástico é um processo de Markov, então a sequência de variáveis aleatórias será gerada pela propriedade de Markov (1), formalmente:

$$P[X_{n+1} = a_{in+1} | X_0 = a_{i0}, \dots, X_{in} = a_{in}] = P[X_{in+1} = a_{in+1} | X_{in} = a_{in}] \quad (1)$$

onde $n \in T$ e $T = \{0, 5, 10, \dots\}$ e i o intervalo de valores possíveis que a_i pode assumir, neste caso uma das 7 classes definidas previamente.

Quando o intervalo de valores possíveis para a_i é finito ou infinito numerável, como é o caso deste estudo, o processo de Markov é considerado uma cadeia de Markov. Para demonstrar que o uso e ocupação do solo é um processo markoviano, temos de provar que existe uma dependência estatística entre X_{n+1} e X_n (2) e que a dependência estatística é um processo markoviano de primeira ordem (3).

$$P(X_n = a_n | X_{n-1} = a_{n-1}) \neq P(X_n = a_n) * P(X_{n-1} = a_{n-1}) \quad (2)$$

$$P[X_n = a_n | X_{n-1} = a_{n-1}] = P[X_n = a_n, X_{n-1} = a_{n-1}] / P[X_{n-1} = a_{n-1}] \quad (3)$$

Consideramos um processo de Markov de primeira ordem, quando a transição de uma classe para outra classe, não requer transições intermediárias para outros estados. A dependência estatística pode ser investigada como em qualquer tabela de contingência demonstrando a mudança no uso e ocupação do solo entre X_n e X_{n-1} (Murteira 1990).

A utilização de um modelo de Markov, representa as alterações de uso e cobertura do solo uma vez que as mudanças de uso do solo não são unidirecionais, i.e., uma parcela de solo de uma determinada classe pode alterar-se para outra classe de solo a qualquer momento. Neste estudo, irá testar-se se são processos de Markov utilizando dois tipos de dados diferentes e épocas diferentes, sendo este teste realizado para as alterações ocorridas entre 1990 e 2006 utilizando dados CLC e entre 1995 e 2010 através das unidades amostrais que correspondem a cerca de 60% do território. Para inferir da associação ou da independência entre as classes de uso e ocupação do solo nos diferentes anos da tabela de contingência, a variável aleatória com a distribuição qui-quadrado é definida da seguinte forma (4):

$$\chi^2 = \sum_i \sum_j ((N_{ij} - M_{ij})^2 / M_{ij}) \quad (4)$$

Onde N será a matriz de contingência mostrando a mudança no uso e ocupação do solo, entre o período de 1990 a 2000 quando da utilização da CLC e entre 1995 e 2010 quando da utilização das unidades amostrais, M é a matriz de contingência com os valores esperados da mudança, assumindo a hipótese de independência (Murteira 1990). O χ^2 mede a distância entre os valores observados de mudança de uso e ocupação do solo e os valores esperados, assumindo independência e deve ser suficientemente elevado para provar (2), considerando $(7 - 1)^2$ graus de liberdade, uma vez que são analisadas sete classes de uso e ocupação do solo (Cabral et al. 2014; Santos et. al 2014).

O mesmo teste não-paramétrico será utilizado para testar a propriedade de Markov. Neste caso, os valores esperados a serem comparados com os valores observados são calculados a partir da equação Chapman-Kolmogorov (5) (Kijima 1997), assumindo que estas variáveis são geradas por um processo de Markov de 1ª ordem:

$$P(X_n = a_n | X_m = a_m) = P(X_1 = a_1 | X_m = a_m).P(X_n = a_n | X_1 = a_1), m \leq l \leq n \quad (5)$$

A matriz de probabilidades de transição será estimada pela matriz de contingência, que mostra as frequências relativas de alteração de uso e ocupação do solo num determinado período de tempo.

Segundo a equação Chapman-Kolmogorov, a matriz de probabilidades de transição de 1990 para 2006 (Tabela 4), pode ser calculada multiplicando a matriz de probabilidades de transição 1990-2000 (Tabela 2) pela matriz de probabilidades de transição 2000-2006 (Tabela 3), utilizando os dados CLC.

Com as unidades amostrais, o cálculo da matriz de probabilidades de transição de 1980 para 2010 (Tabela 7), pode ser feito através da multiplicação da matriz de probabilidades de

transição 1980-1995 (Tabela 5) pela matriz de probabilidades de transição 1995-2010 (Tabela 6).

A matriz de transição representa mudanças multidirecionais entre as diferentes classes, ou seja, para as diferentes classes utilizadas existem várias mudanças entre classes. A matriz de transição é uma ferramenta para monitorizar as mudanças futuras, informando quais as mudanças ocorridas e qual a sua magnitude (Olaya 2009).

1990											
2000	Classes	AG	AF	A	CA	F	I	ZH	Total	Δ	Δ%
	AG	3581590	2522	49	134	24662	12861	65	3621883	-74718	-2,02
	AF	834	623221	0	24	4193	452	0	628724	-6186	-0,97
	A	45394	489	210987	152	20591	4643	174	282430	70736	33,41
	CA	3647	610	53	2511412	987	1454	136	2518299	5469	0,22
	F	53772	7980	325	0	3232857	103531	0	3398465	94073	2,85
	I	11164	88	276	1017	21093	823094	0	856732	-89346	-9,44
	ZH	200	0	4	91	9	43	28324	28671	-28	-0,10
	Total	3696601	634910	211694	2512830	3304392	946078	28699	11335204	323719	2,86

Tabela 2- Tabela de contingência de 1990-2000 (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)

2000											
2006	Classes	AG	AF	A	CA	F	I	ZH	Total	Δ	Δ%
	AG	3559374	1166	118	0	9659	7771	19	3578107	-43776	-1,21
	AF	2794	610669	0	0	7769	362	0	621594	-7130	-1,13
	A	13557	179	281963	32	12127	2157	38	310053	27623	9,78
	CA	4906	3557	88	2518001	6753	2444	0	2535749	17450	0,69
	F	39622	13102	139	0	3330681	44529	0	3428073	29608	0,87
	I	1611	51	122	48	31476	799463	0	832771	-23961	-2,80
	ZH	19	0	0	218	0	6	28614	28857	186	0,65
	Total	3621883	628724	282430	2518299	3398465	856732	28671	11335204	206439	1,82

Tabela 3 - Tabela de contingência de 2000-2006 (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)

1990											
2006	Classes	AG	AF	A	CA	F	I	ZH	Total	Δ	Δ %
	AG	3521515	3653	114	124	33120	19504	77	3578107	-118494	-3,21
	AF	3545	605608	0	24	11638	779	0	621594	-13316	-2,10
	A	58953	668	210826	184	32677	6551	194	310053	98359	46,46
	CA	8714	4211	67	2511244	7328	4031	154	2535749	22919	0,91
	F	92612	20689	380	10	3186178	128197	7	3428073	123681	3,74
	I	11043	81	303	935	33442	786967	0	832771	-113307	-11,98
	ZH	219	0	4	309	9	49	28267	28857	158	0,55
	Total	3696601	634910	211694	2512830	3304392	946078	28699	11335204	484599	4,28

Tabela 4 - Tabela de contingência de 1990-2006 (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)

1980											
1995	Classes	AG	AF	A	CA	F	I	ZH	Total	Δ	Δ %
	AG	181148	1889	177	67	2581	3526	2	189390	-10534	-5.3
	AF	478	42582	0	0	2864	119	0	46043	-4015	-8.0
	A	2324	61	14844	7	1152	715	7	19110	3917	25.8
	CA	94	59	8	4288	32	92	0	4573	81	1.8
	F	7781	4908	79	30	137478	11447	0	161723	4592	2.9
	I	8095	559	84	98	13003	55770	12	77621	5909	8.2
	ZH	4	0	1	2	21	43	1065	1136	50	4.6
	Total	199924	50058	15193	4492	157131	71712	1086	499596	62421	12.49

Tabela 5 - Tabela de contingência de 1980-1995 (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)

1980											
2010	Classes	AG	AF	A	CA	F	I	ZH	Total	Δ	$\Delta \%$
	AG	162067	3410	157	46	4312	4899	0	174891	-25033	-12.5
	AF	1198	38311	0	0	4141	219	0	43869	-6189	-12.4
	A	5203	145	14825	15	3004	1580	8	24780	9587	63.1
	CA	751	461	15	4265	253	169	0	5914	1422	31.7
	F	18114	7178	106	39	130196	17323	0	172956	15825	10.1
	I	12574	553	90	126	15210	47480	17	76050	4338	6.0
	ZH	17	0	0	1	15	42	1061	1136	50	4.6
	Total	199924	50058	15193	4492	157131	71712	1086	499596	101391	20.3

Tabela 6 - Tabela de contingência de 1995-2010 (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)

1995											
2010	Classes	AG	AF	A	CA	F	I	ZH	Total	Δ	$\Delta \%$
	AG	166907	1638	65	3	2591	3687	0	174891	-14499	-7.7
	AF	856	40018	0	3	2738	254	0	43869	-2174	-4.7
	A	2788	69	18853	18	1782	1267	3	24780	5670	29.7
	CA	668	400	18	4483	244	101	0	5914	1341	29.3
	F	10657	3662	108	10	144981	13532	6	172956	11233	6.9
	I	7501	256	66	56	9387	58780	4	76050	-1571	-2.0
	Total	189390	46043	19110	4573	161723	77621	1136	499596	64451	12.90

Tabela 7- Tabela de contingência de 1980-2010 (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)

Os resultados apresentados nas tabelas de contingência, são obtidos através do comando CROSSTAB do software IDRISI SELVA (Clark Labs 2013). De acordo com Pontius et al. (2004), a forma mais pragmática para analisar a mudança na terra através de dois mapas do mesmo local em diferentes períodos T_1 e T_2 , (onde T_1 é o período mais antigo e T_2 o período mais recente) é, examinar as mudanças com a matriz de transição para identificar as transições mais importantes e em seguida, pesquisar os processos que geram as transições.

Na matriz de transição ou matriz de tabulação cruzada tradicional, as linhas referem-se ao período T_1 e as colunas ao período T_2 . O valor apresentado em cada célula denota a proporção da paisagem que experimentou uma transição de uma classe no período T_1 para outra classe no período T_2 . As células da diagonal, indicam a permanência da proporção para cada uma das classes entre os dois períodos. A coluna Δ , indica o valor de mudança entre os dois períodos para cada uma das sete classes, indicando-nos se nessa mudança houve ganho ou perda.

Para verificar as alterações ocorridas, utilizou-se novamente o comando CROSSTAB do IDRISI SELVA (Clark Labs 2013). Sendo necessário, para a utilização do referido comando, converteu-se as cartas em formato *shapefile* para *grid (raster)*. O uso de dados *raster*, é claramente mais adequado para a elaboração das matrizes de transição, uma vez que pode realizar-se comparações célula a célula entre ambas as camadas e simplesmente obter a contagem de células onde acontece a mudança (Olaya 2009).

A utilização do comando CROSSTAB (Clark Labs 2013) permite verificar as alterações nas classes de uso do solo em estudo de forma quantitativa, permitindo também obter mapas onde se podem visualizar as alterações indicadas nas tabelas.

2.2.1.1. MARKOV

O módulo MARKOV do IDRISI SELVA (Clark Labs 2013), simula o estado de um sistema num determinado tempo, a partir dos estados anteriores. É um procedimento discreto em tempo discreto, i.e., o valor no tempo t_2 , valor da previsão depende dos valores dos tempos t_0 , que corresponde ao primeiro tempo, ou ao tempo mais antigo e t_1 ao período mais recente.

O módulo MARKOV foi aplicado, utilizando dois mapas em períodos diferentes, 1990 e 2000 (Figura 3), utilizando os dados CLC. Utilizou-se o mesmo módulo para os períodos 1995 e 2010 (Figura 4) aquando da utilização dos dados LANDYN com as mesmas sete classes de solo.

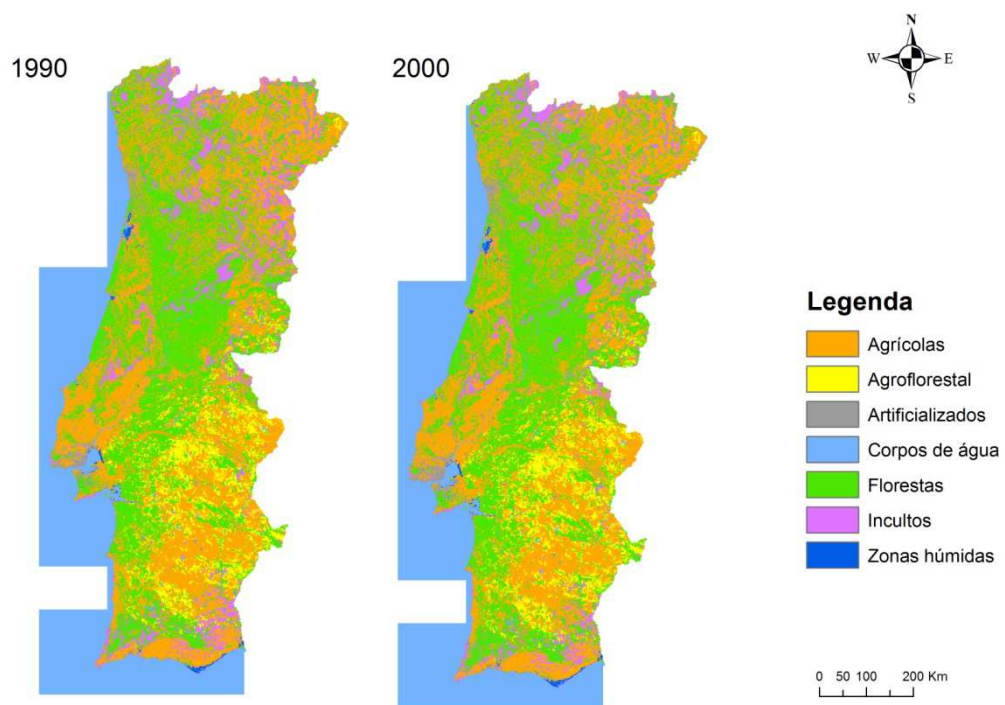


Figura 3- Dados utilizados para a previsão com cadeias de Markov, dados CLC

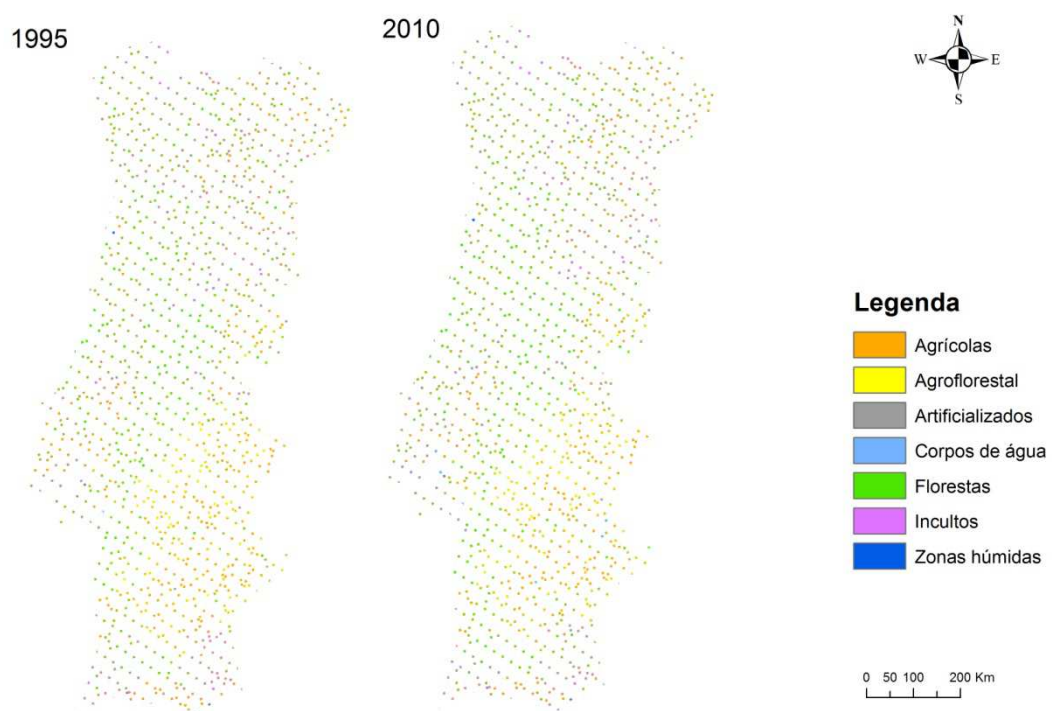


Figura 4- Dados utilizados para a previsão com cadeias de Markov, unidades amostrais LANDYN

Após o processo efetuado pelo comando MARKOV do IDRISI SELVA foram gerados os seguintes outputs (Eastman 2003):

- Matriz de probabilidades de transição que expressa a probabilidade para cada *pixel* de uma dada categoria de uso do solo, poder mudar (ou não), para outra categoria no próximo período;
- Matriz de áreas de transição que expressa o total da mudança esperado, em pixels, de uma dada categoria de uso do solo para outra, no próximo período de tempo;
- Grupo de imagens de probabilidades condicionais, cada categoria de uso do solo demonstra a probabilidade de cada *pixel* designado para a categoria no próximo período.

2.2.2. Modelos Espaciais Dinâmicos

Um modelo espacial dinâmico, é um modelo que evolui não só de forma espacial, dado que sofre alterações no espaço físico, bem como no espaço temporal.

O avanço dos modelos espaciais é inquestionável, assim como a evolução dos modelos estáticos para os modelos dinâmicos. Estes modelos descrevem a evolução dos padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo e podem ser denominados de preditivos ou de simulação (Scarassatti e Costa 2010).

Os modelos dinâmicos são elementos indispensáveis na simulação de cenários de uso e ocupação do solo, devido a sua complexidade, uma vez que permitem a visualização dos processos a gestão dos dados geográficos e a modelação espacial.

Os modelos dinâmicos espaciais devem o seu desenvolvimento, ao desenvolvimento da Teoria do Caos⁵ em conjunto com ferramentas de SIG. Estes modelos associados ao uso e ocupação do solo, aparecem inicialmente ligados à modelação de crescimento das áreas urbanas, que por sua vez estão diretamente ligados aos modelos de AC (Rocha 2012).

⁵ A Teoria do Caos é um campo de estudo em matemática, física, economia e filosofia que aborda o comportamento de sistemas dinâmicos e pode ser definido como “o estudo qualitativo do comportamento instável, em sistemas dinâmicos não-lineares, determinísticos”. Em 1963 Edward Lorenz introduziu, o “efeito borboleta”, uma das bases mais importantes da teoria do caos (Kellert 1993).

2.2.2.1. Autômatos Celulares

Os modelos de AC tornaram-se populares em grande parte devido ao fato de serem acessíveis, apresentarem uma simplicidade operacional, serem dinâmicos e conterem complexidade suficiente para simular mudanças inesperadas e surpreendentes como as observadas em fenômenos emergentes. Esses modelos são flexíveis, no sentido de que fornecem uma estrutura não sobrecarregada com suposições teóricas, e que é aplicável a um espaço representado como uma grelha. Estes modelos podem, portanto, realizar uma articulação com dados matriciais, comumente usados em SIG (Almeida et al. 2003).

A origem dos AC, ronda a década de quarenta, nesta altura Stanislaw Ulam estudava o crescimento de cristais no Laboratório Nacional de Los Alamos. Na mesma altura John Von Neuman trabalhava em sistemas auto replicativos (Kemp 2007). Von Neuman com sugestão de Ulam, criou um modelo matemático abstrato, onde imaginou um universo discreto que consistia numa grelha bidimensional de máquinas de estados finitos, denominadas células. Estas células encontra-se interligada localmente umas com as outras, mudam os seus estados de forma síncrona, dependendo dos estados das células vizinhas determinadas por regras locais, onde todas as células utilizam o mesmo tipo de regras de modo a ser um sistema homogêneo (Kari 2005). É com base nos estudos de Von Neuman, que outros autores continuaram a explorar os AC, em 1970, John Conway inventou o mais popular dos AC, e que denominou como “O Jogo da Vida”, este jogo tinha como objetivo projetar um conjunto de regras simples para estudar o comportamento macroscópico de uma população. Conway considerou um autômato celular a duas dimensões, a dois estados (vida e não vida) e utilizou como vizinhança a vizinhança de Moore (Sarkar 2000). Os anos oitenta foram um período importante na história do AC. Em 1983, Stephen Wolfram publicou a primeira de uma série de publicações (Wolfram 1983), sobre uma extensa análise experimental dos padrões de crescimento dos AC. A abordagem adotada, considera os AC como modelos complexos, i.e., as regras utilizadas pelos AC são simples, mas originam padrões extremamente complicados (Sarkar 2000).

Por estas razões, os modelos de simulação espacial baseados em AC tornaram-se cada vez mais utilizados sendo incluídos em softwares comerciais de SIG, devido à sua facilidade de implementação e capacidade de serem readaptados para reproduzir vários tipos de fenômenos espaciais, como propagação de incêndio, (Karafyllidis e Thanailakis 1997) propagação de epidemias (Hargrove et al 2000), dinâmicas florestais (Lett et al. 1999), crescimento urbano (White et al. 2000) e mudanças de uso do solo (Soares-filho et al 2002).

De acordo com Tobler (1970), que declarou a primeira lei da geografia: tudo está relacionado com tudo o resto, mas as coisas mais perto estão mais relacionadas, do que as mais distantes, embora despercebido no seu estudo sobre o crescimento demográfico da

população em Detroit, Tobler (1970), acabou por abordar um conjunto de ideias que hoje vão de encontro com as definições de AC.

Os AC podem ser definidos como estruturas matriciais (ou *raster*) integrantes de SIG, que tornam possível modelar o estado futuro de um objeto a partir do seu estado atual e da sua interação com os objetos vizinhos.

A evolução do autômato celular de um instante para outro processa-se com base em regras aplicadas em função dos estados da própria célula, dos estados das células vizinhas e de outra informação sobreposta à matriz (Matos, 2008).

Num AC, cada elemento (célula) comporta-se individualmente e os resultados são imprevisíveis, assumindo ao nível global, padrões diversos. É assim possível, simular ao longo do tempo e no espaço um mundo 'Autômato Celular' que pretende ser o reflexo da realidade (Silva 2002).

Os modelos baseados em AC, visam libertar o analista da visão estática do espaço e ressaltar a componente dinâmica como uma parte essencial do espaço geográfico. Os AC estendem esta analogia de forma a providenciar a visualização de todo um conjunto de células (pixéis) em intenção, sendo cada célula um computador (automatizado). Estes modelos, adotam uma abordagem de baixo-para-cima (*bottom-up*), na medida em que as interações locais (vizinhança) dão relevo à formação de complexos padrões globais. Assim, os AC podem ser entendidos como um sistema espacial dinâmico e relativamente simples, no qual o estado de cada célula da matriz depende do estado prévio das células, que se encontram dentro de uma determinada vizinhança, de acordo com um conjunto de regras de transição (Tenedório 2002).

A expressão que descreve um autômato celular pode assumir diversas formas, dependendo do tipo e regras contempladas. Como exemplo, se o valor na célula a_{ik} no instante $t+1$ for expresso em função dos estados das células vizinhas e da informação adicional traduzida, neste caso numa matriz de recurso R e numa matriz de atratividade A , pode escrever-se (Matos 2008):

$$a_{ik}^{(t+1)} = F(a_{i-1:i+1, k-1:k+1}^t, R_{i-1:i+1, k-1:k+1}^t, A_{i-1:i+1, k-1:k+1}^t) \quad (6)$$

O autômato celular é caracterizado por fases de transições que pode gerar padrões complexos através de regras de transição simples (Liu 2009).

Tenedório *et al.* (2006) defendem que os modelos de AC, têm uma capacidade de modelação superior à dos SIG. As variáveis espaciais incluídas nos AC, são atualizadas de forma dinâmica durante o ciclo iterativo o que se traduz em resultados não determinísticos.

2.2.2.2. AC e Uso e ocupação do solo

As ferramentas de modelação baseadas em autómatos, possuem muitas vantagens para simulação de fenómenos urbanos no espaço: a estrutura descentralizada dos sistemas autómatos; a sua capacidade de manipular diretamente elementos individuais espaciais e não espaciais; e a sua simplicidade de formulação, são as principais vantagens apontadas por aqueles que constroem e desenvolvem os modelos (Rocha 2012).

Modelos de AC têm aplicabilidade em áreas como Ecologia, Biologia, Epidemiologia, Termodinâmica, Hidrologia, Meteorologia, entre outras, uma vez que estas áreas são capazes de gerar dinâmicas que reproduzem processos tradicionais de mudanças por difusão, mas que ao mesmo tempo contém complexidade suficiente para simular padrões inusitados e surpreendentes como aqueles fenómenos emergentes (Batty 1997).

A maior utilização de modelação com AC surge sobretudo no final da década de 80, é também nesta altura que os modelos para uso e ocupação do solo em sistemas urbanos se expandem. Estas aplicações foram crescendo rapidamente entre os investigadores urbanos, graças às suas características intrinsecamente espaciais, que são inerentemente atraentes para a sua utilização a problemas geográficos (White e Engelen 1993).

As complexidades espaciais e temporais dos sistemas urbanos podem ser modeladas através da correta e apropriada definição de regras de transição nos modelos de AC. Efetivamente, os modelos de evolução de uso do solo baseados em AC são bastante válidos para descrever a dinâmica e o comportamento desses sistemas (Theobald e Hobbs 1998).

A simplicidade e a natureza intuitiva dos AC, não só simplificam o processo de construção do modelo, mas também tornam mais fácil para os modeladores compreenderem o desenvolvimento do sistema e interpretar os resultados do modelo, segundo Benenson e Torrens (2004) o modelo de AC imita a maneira pela qual nós estudamos, compreendemos e descrevemos o sistema e os fenómenos no mundo real.

Em Portugal existem alguns estudos de modelação com AC. Rocha *et al.* (2004), utilizaram AC para a previsão das alterações nos padrões de uso e ocupação do solo na Área Metropolitana de Lisboa, Tenedório *et al.* (2006) e Rocha *et al.* (2004) simularam a evolução da linha de costa e uso de solo.

2.2.2.3. Cadeias de Markov e Autômatos Celulares

Das técnicas conjuntas que se podem empregar e que dão importância às relações espaciais, são as cadeias de Markov e os AC. As cadeias de Markov são ferramentas matemáticas, que nos permite definir as regras em que operam os AC, embora outras abordagens possam ser aplicadas de forma semelhante (Olaya 2009).

Os modelos de AC iniciam-se com dependências de vizinhança e modificam as regras de transição para incluir os fatores ambientais e não locais. Os modelos de Markov, começam com estimativas de probabilidades de transição e tornam-nas dependentes do estado dos vizinhos, se tal dependência for descoberta.

Os Autômatos Celulares ou “Cellular Automata” (CA) como são conhecidos no meio científico internacional, são compostos por quatro elementos básicos (Batty 1997):

1. Células – A célula é a unidade básica do espaço celular. As células são organizadas numa grelha espacial, são objetos do universo de modelação que podem assumir diferentes formas (quadrada, retangular, hexagonal) e podem ter diferentes dimensões. A modelação bidimensional é a mais comum, sobretudo em modelação de uso do solo, no entanto o formato unidimensional é utilizado na representação de objetos lineares como a modelação do tráfego urbano. Por exemplo, para a representação da altura de edifícios pode-se utilizar um autômato celular tridimensional, sendo este tipo de autômato pouco utilizado, uma vez que carece de muito desenvolvimento (Rocha 2012).
2. Estado – atributo único (discreto) apresentado por cada célula num intervalo de tempo considerado.
3. Vizinhança – é o conjunto de células que fazem fronteira com as restantes células dependendo da dimensão da grelha. Cada célula possui uma vizinhança de tamanho igual para todas as células que determina a sua evolução. Se a grelha for unidimensional, a vizinhança faz-se com as células à esquerda e à direita. Numa rede bidimensional há dois tipos básicos de vizinhança: de Von Neuman (cinco células que inclui os vizinhos a Norte, Sul, Este e Oeste, tendo um formato de cruz) e a vizinhança de Moore, que inclui as células contempladas por Von Neuman e as células em diagonal, Noroeste, Nordeste, Sudoeste e Sudeste. Podem ser vizinhança de 3x3 ou de 5x5 células (Maerivoet e De Moor 2005), como se pode verificar na figura 5.

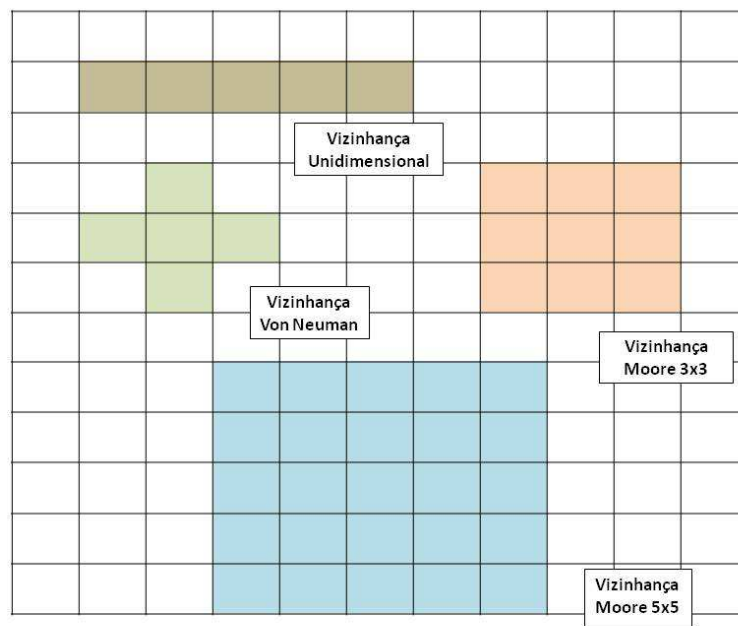


Figura 5- Diferentes configurações da vizinhança AC

4. Regras de transição – determinam ou não as mudanças de estado das células a cada instante de tempo (passo ou iteração). As regras são uniformes e aplicam-se indistintamente a todas as células, estado ou vizinhança.

2.2.2.4. CA_MARKOV

A modelação dinâmica procura superar as limitações dos SIG, realizando simulações de processos temporais, analisando as transformações e dinâmicas de uso e ocupação do solo.

O software IDRISI SELVA, mostrou-se uma ferramenta útil para a modelação dinâmica, utilizando a projeção estocástica por meio de cadeias de Markov e AC. As cadeias de Markov, demonstram a probabilidade condicional de qualquer evento futuro com variáveis definidas num espaço de tempo discreto, mas ao aplicar-se um filtro de AC nas projeções resultantes do processo estocástico, são incorporadas também variáveis explicativas de mudança e assim é produzido um resultado espacialmente mais próximo à realidade verificada. Estas rotinas utilizadas, demonstram a possibilidade de desenvolvimento de

modelação, as suas diversas aplicações e as atividades relacionadas com o planeamento urbano (Scarassatti e Costa 2010).

Para a utilização da componente espacial utilizou-se o comando CA_MARKOV, do IDRISI SELVA que utilizou como componentes, o mapa de projeção para 2010 (Figura 6), calculado pela matriz de transição de 1990-2000 e os mapas de aptidão de cada classe projetados para 2010. O filtro de vizinhança utilizado foi de 5x5 (vizinhança de Moore). Neste estudo as transformações de uso do solo foram modeladas para um período de 20, 30 e 40 anos projetando-se assim para os anos 2020, 2030 e 2040 (Figura 7).

2010

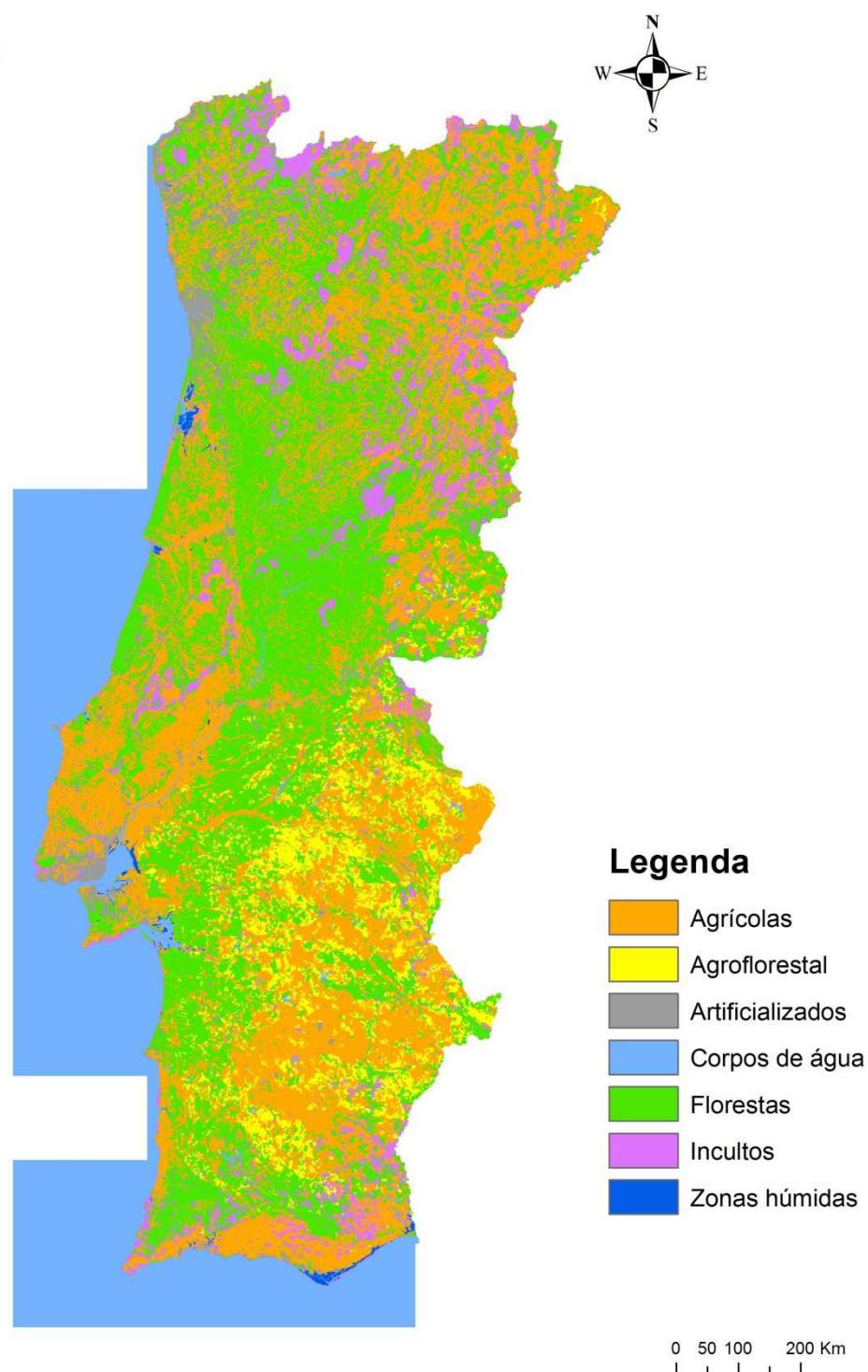


Figura 6- Mapa previsto para 2010 com CA_MARKOV

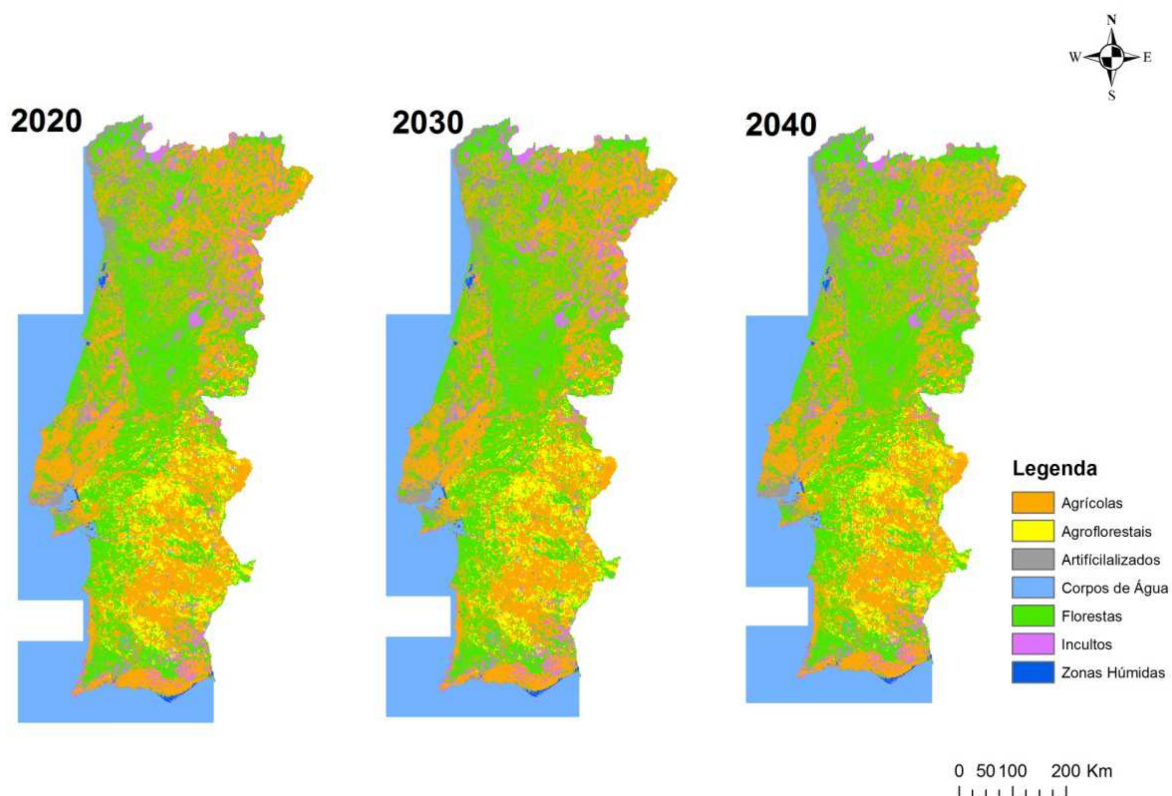


Figura 7 – Previsões para 2020, 2030 e 2040

Este comando permite determinar a localização de mudança com base no número de células que devem ser submetidas a cada transição. As células que mudam de categoria são selecionadas de acordo com a maior aptidão de transição (Araya e Cabral 2010), ou seja, para calcular cada mapa de aptidão é calculado um fator de ponderação espacialmente explícito para cada mapa de aptidão de cada classe de uso do solo. Esta ponderação é mais intensa em áreas de uso do solo já existentes, assim a mudança deverá ocorrer próxima das classes de uso do solo e não de uma forma aleatória, funcionando como uma máscara, onde esse resultado será multiplicado quantas vezes o número de iterações necessárias. Cada classe de uso do solo é filtrada e então multiplicada no mapa de probabilidade, o resultado da multiplicação será projetado no novo mapa de aptidão, de acordo com o número de anos que se prevê para o futuro. No caso da projeção para 2020, 2030 e 2040 o número de iterações é de 20, 30 e 40 respetivamente (uma vez que o mapa base é de 2000).

CA_MARKOV permite, independentemente do número de classes a modelar, simular transições de cada classe, ou seja, é capaz de modelar quer as alterações temporais, quer espaciais.

A forma como controla a dinâmica temporal entre os diferentes tipos de uso do solo, é através da probabilidade de transição, já as dinâmicas espaciais são controladas por regras locais através de um mecanismo AC, considerando a configuração da vizinhança e probabilidade de transição (Sylvertow et al 1992).

No modelo CA_MARKOV, as cadeias de Markov administram a dinâmica temporal entre as 7 classes de uso do solo enquanto as dinâmicas espaciais são controladas por regras locais determinadas pelo filtro espacial dos AC ou por potenciais mapas de transição (Maguire et al. 2005).

Este modelo executa regras de contingência, com que simula o crescimento de uma classe de uso e ocupação do solo, perto de classes semelhantes (Kamusoko et al. 2011). Assim, se alguma mudança ocorrer longe da fronteira de classes pré-constituídas, este modelo não será capaz de prever essas células.

A figura 8, demonstra toda a execução do processo. Após a confirmação da hipótese H0-utilização de cadeias de Markov para a área de estudo, utilizou-se como input para o modelo CA_MARKOV, os mapas de aptidão de cada classe resultantes do modelo MARKOV do IDRISI SELVA para o ano de 2010 (ano que será validado com o mapa real para o mesmo ano, utilizando as unidades amostrais provenientes da DGT) e as áreas de transição para 10 anos.

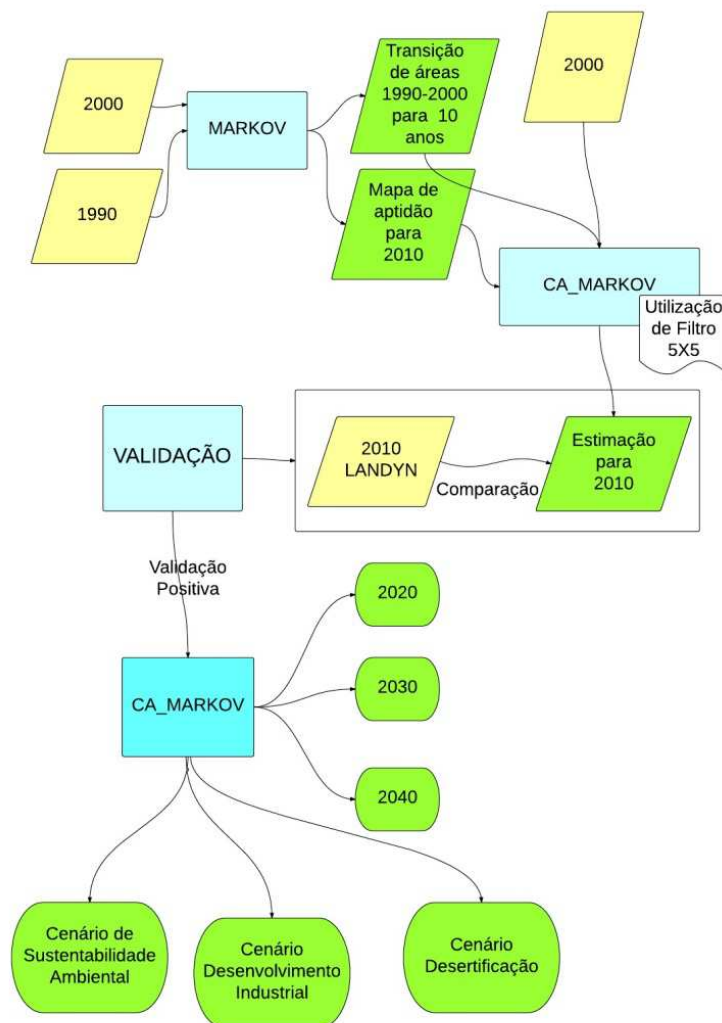


Figura 8 - Processo CA_MARKOV

2.2.3. Modelo de Regressão Logística

Os modelos de RL, são geralmente métodos estatísticos usados para desenvolver modelos da distribuição de presenças/ausências (Rocha 2012), podendo portanto ser representados na forma de variáveis binomiais (Saturnino 2012).

A RL é uma forma de regressão adequada a fenômenos de conversão binária, podendo ser representada por variáveis dependentes nominais, binárias e dicotômicas.

A variável dependente (y) é o que nos indica se houve ou não mudança de uso e ocupação do solo. P é o conjunto de variáveis independentes x_1, x_2, \dots, x_p , sendo que as variáveis independentes podem afetar as mudanças de uso e ocupação do solo.

De acordo com Ordóñez Galán e Martínez-Alegría (2003) a RL, incorpora três componentes, a aleatória, a sistemática e a de ligação, o *logit*:

I) A componente aleatória identifica a variável dependente (Y) ou de resposta binária, com distribuição de probabilidade binomial;

II) A componente sistemática especifica as variáveis independentes ou explicativas (X), quer sejam contínuas ou qualitativas (categóricas) e que são introduzidas no modelo de forma linear;

III) A componente de ligação $g(p)$, monótona e diferenciável, que descreve a relação funcional entre p e as variáveis explicativas. O p é o valor esperado da variável Y que representa a probabilidade de ocorrência, a qual varia entre 0 e 1.

A probabilidade de mudança de uso e ocupação do solo é representada por $P(y = \frac{1}{X})$, sendo *logit* definido por:

$$\text{logit}(y) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \dots b_px_p \quad (7)$$

Onde b_0 é a constante da equação e $b_1, b_2 \dots b_p$ são os coeficientes das variáveis x_1, x_2, \dots, x_p .

A probabilidade $P(y = \frac{1}{X})$, pode ser expressa pelo modelo de regressão logística (Martins 2013):

$$P(y = \frac{1}{X}) = \frac{1}{1 + e^{-b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \dots b_px_p}} \quad (8)$$

Assim P_X , é a expressão que define as mudanças de uso e ocupação do solo.

A variável dependente assume o valor 1, onde se considera a máxima probabilidade e 0 onde se considera a probabilidade mínima, de acordo com este modelo a suscetibilidade de mudança de uso e ocupação do solo pode ser obtida a partir da equação 8.

2.2.3.1. LOGISTICREG

O Modelo de RL incorporado no software IDRISI SELVA designa-se por LOGISTICREG (Clark Labs 2013), assume a função de regressão logística binominal em imagens, onde a variável dependente tem várias categorias.

LOGISTICREG realiza regressão logística binominal, onde a variável dependente deve ser de natureza binária, ou seja, pode ter apenas dois valores possíveis (0 e 1) (Eastman 2003).

Para a utilização deste modelo utilizou-se, para incorporar as variáveis independentes, o modelo PATTERN (Clark Labs 2013), que calcula vários índices de padrões numéricos (diversidade, domínio, frequência, fragmentação etc.). Utilizando um modelo de 3 por 3, 5 por 5 ou 7 por 7, no caso do presente projeto utilizou-se o modelo 3 por 3 (Eastman 2003).

Inicialmente é necessário reclassificar as sete classes para classes binárias (0 e 1) para os dados de 1990 e 2000, cada classe reclassificada será em seguida utilizada pelo comando PATTERN. O resultado obtido pelo comando PATTERN, será utilizado como variável independente para o modelo de RL e o resultado do RECLASS (Clark Labs 2013), como variáveis dependentes. O Modelo LOGISTICREG será executado sete vezes, uma por cada classe de uso do solo.

Os resultados obtidos pelo modelo LOGISTICREG serão utilizados como mapa de aptidão, juntamente com as matrizes de transição obtidas pelo modelo Markov entre 1990 e 2000 e a carta de base CLC para 2000 que serão processados pelo módulo CA_MARKOV para 2010. Após a validação do modelo, as alterações de uso e ocupação do solo para 2020, 2030 e 2040 serão estimadas como demonstrado na figura 9.

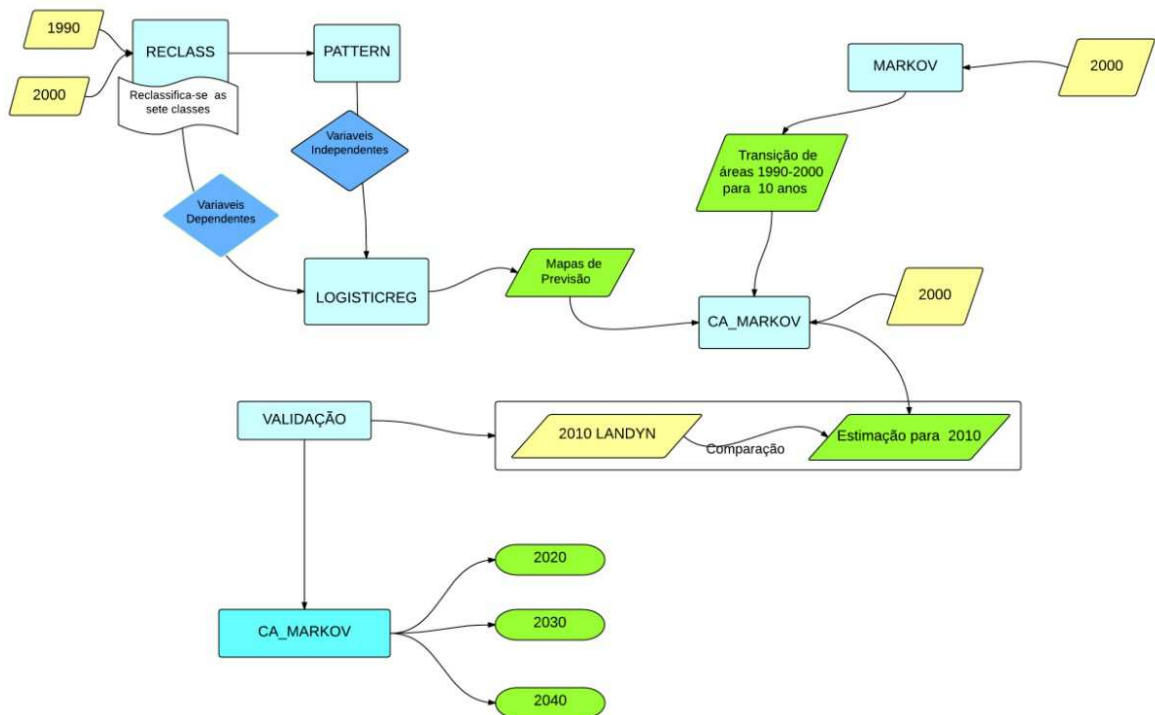


Figura 9 - Metodologia utilizada para o modelo de regressão logística

2.2.4. Validação

Um bom método de comparação é necessário para realizar a validação dos resultados espaciais de forma estruturada (Ahmed 2013).

Há muitas técnicas para validação, incluindo a previsão de concordância e discordância entre o mapa de previsão e o mapa de referência (Pontius et al. 2004).

Para Ahmed (2013), a comparação do mapa de referência com o mapa simulado utilizando o mesmo período de tempo, não é uma boa comparação uma vez que, não consegue distinguir a verdadeira concordância das mudanças ocorridas para resolver esta questão. Pontius e Malanson (2005) sugeriram a comparação de três mapas, comparando as alterações feitas de um tempo 1 (utilizado como referencia 1) para o tempo 2 (utilizado como referencia 2) e posteriormente para o tempo 2 simulado.

De forma a validar a precisão do Modelo, comparou-se o mapa de 2010 previsto, com o mapa de 2010 real que corresponde às unidades amostrais para a década de 2010 (499596 ha, cerca de 6% da área total de Portugal continental). Para tal utilizou-se o comando VALIDATE do software IDRISI SELVA (Clark Labs 2013), que consiste em calcular medidas que indicam os erros de quantidade e erros de localização entre os dois mapas. O erro de

discordância de quantidade ocorre quando a quantidade de células de uma classe no mapa simulado é diferente da quantidade de células da mesma classe do mapa de referência. O erro de discordância de localização, ocorre quando a localização de células de uma classe no mapa simulado é diferente da localização de células dessa classe no mapa de referência. Estas medidas de erro são calculadas de acordo com métodos apresentados por Pontius e Millones (2011).

O VALIDATE promove uma análise comparativa com base no Índice *Kappa*⁶ e divide a validação em vários componentes, cada um com uma forma especial de *Kappa* ou de estatística associada.

Com estes valores é possível avaliar o sucesso com que cada componente é capaz de especificar o local da mudança versus a quantidade de mudança.

A estatística *Kappa*, compara a eficácia de dados aleatórios. A aleatoriedade não é uma opção lógica para mapeamento, além disso vários índices *Kappa* sofrem de erros teoricamente básicos. Então, é recomendável que a discordância de quantidade e de localização seja utilizada para avaliar a eficácia, ao invés da estatística *Kappa* (Pontius e Milones 2011).

Para Pontius et al. (2004), a estatística *Kappa* nem sempre nos indica a informação mais adequada, no entanto ainda é o índice mais utilizado para a comparação e validação de mapas simulados. Embora a informação estatística obtida pelo VALIDATE, seja de acordo com o índice *Kappa*, para Pontius et al. (2004) essa informação confunde o erro de quantidade com o erro de localização. Assim, a informação que observamos para a comparação dos três modelos, baseia-se apenas nos valores obtidos para as componentes de concordância e discordância e na relação da quantidade e localização, como verificado na tabela 17 do capítulo 3, que compara os dois modelos elaborado e o modelo nulo.

O módulo VALIDATE do IDRISI SELVA dispõe de um método que, mede a concordância entre duas imagens (do tipo inteiro ou byte), sendo uma, o mapa de comparação obtido pela

⁶ A Estatística K é uma medida de concordância usada em escalas nominais que nos fornece uma ideia do quanto as observações se afastam daquelas esperadas, fruto do acaso, indicando-nos assim o quão legítimas as interpretações são. A medida de concordância Kappa é a relação: $K = \frac{P(0) - P(c)}{1 - P(c)}$, onde P(0) é a quantidade observada de que K esta em concordância, P(c) é a quantidade esperada de concordância. Quando existe total concordância k=1, K=0 corresponde a coincidência aleatória de mudança “falta de acordo” (Cohen 1968).

simulação e outra o mapa de referência ou mapa real. É através do módulo VALIDATE que se verifica a validade do mapa obtido através de simulação.

De acordo com Eastman, (2003) o modulo VALIDATE responde a duas questões importantes: (1) Como é que duas imagens concordam em termos de quantidade de células em cada classe/categoria? e (2) Como é que duas imagens concordam em termos de localização das células em cada classe/categoria?

Para responder a estas perguntas, o modulo VALIDATE utiliza como base a estatística *Kappa*, indicando-nos o quanto o mapa de comparação concorda com o mapa de referência. A análise separa a concordância e a discordância entre as duas imagens analisadas pelos seguintes resultados (Eastman, 2003):

- *AgreementChance* (concordância devido ao acaso);
- *AgreementQuantity* (concordância devido a quantidade);
- *AgreementGridcell* (concordância devido ao localização ao nível da célula da grelha);
- *DisagreeGridcell* (discordância devido à localização ao nível da célula da grelha); e
- *DisagreeQuantity* (discordância devido à quantidade).

3. RESULTADOS

3.1. Projeção não espacial de uso e ocupação do Solo para 2040

Conforme descrito na metodologia, a principal hipótese a ser testada (H_0) é a de que as mudanças de uso e ocupação de solo na área de estudo, são geradas por um processo de Markov de primeira ordem. Para testar a hipótese principal deste estudo (H_0), duas hipóteses subsidiárias foram formuladas (Cabral et al. 2014; Santos et. al 2014):

- H_1 - o uso e ocupação do solo em momentos temporais diferentes não é estatisticamente independente; e
- H_2 - o uso e ocupação do solo na área de estudo é um processo de Markov.

Para avaliar as mudanças ocorridas na área de estudo, calcularam-se as tabelas de contingência. As tabelas 2,3 e 4 demonstradas no capítulo 2, mostram as alterações ocorridas entre 1990-2000, 2000-2006 e 1990-2006, utilizando a cartografia CLC. As tabelas 5, 6 e 7, também do capítulo 2, demonstram as alterações ocorridas entre 1980-1995, 1995-2010 e 1980-2010, utilizando a cartografia LANDYN. Estas tabelas servem de base ao cálculo de cadeias de Markov. É com base nos cálculos destas tabelas que se verifica as mudanças de uso do solo ocorridas, estas são geradas por um processo de Markov de 1º ordem e assim é possível prever novas alterações para anos futuros.

Em termos de análise das mudanças ocorridas (Tabela 8) nos três períodos em estudo, destaca-se o período entre 1990 e 2006 onde o valor de mudança é de 4,28%. Entre 1990-2000 a mudança é de 2,86% e entre 2000-2006 a mudança aproxima-se dos 2%. Nos três períodos em análise a classe “artificializados” teve sempre uma variação positiva, já a classe “agrícolas” diminui para os três períodos.

Classes	Δ 1990-2000	Δ 200-2006	Δ 1990-2006
Agrícolas	-2,02%	-1,21%	-3,21%
Agroflorestais	-0,97%	-1,13%	-2,10%
Artificializados	33,41%	9,78%	46,46%
Corpos de água	0,22%	0,69%	0,91%
Florsestas	2,85%	0,87%	3,74%
Incultos	-9,44%	-2,80%	-11,98%
Zonas Humidas	-0,10%	0,65%	0,55%
Total	2,86%	1,82%	4,28%

Tabela 8 - Mudanças ocorridas – Dados CLC

A figura 10 demonstra os ganhos e perdas das sete classes de uso e ocupação do solo relativamente aos três períodos analisados com as cartas CLC.

De 1990 para 2000, a classe “incultos” perdeu 11% da sua área para a classe “florestas”.

Entre 2000 e 2006, a classe agrícola foi onde se verificou os valores mais baixos de mudança nas sete classes, nestes seis anos as mudanças ocorridas não foram muito significativas.

De 1990 para 2006, o maior destaque verifica-se não só no aumento da classe “artificializados”, mas também na diminuição da classe “incultos”. A classe “agrícolas” neste período perdeu 3% da sua área para a classe “florestas” tal como a classe “artificializados”, a classe “incultos” perdeu 14% de área para a classe “florestas”.

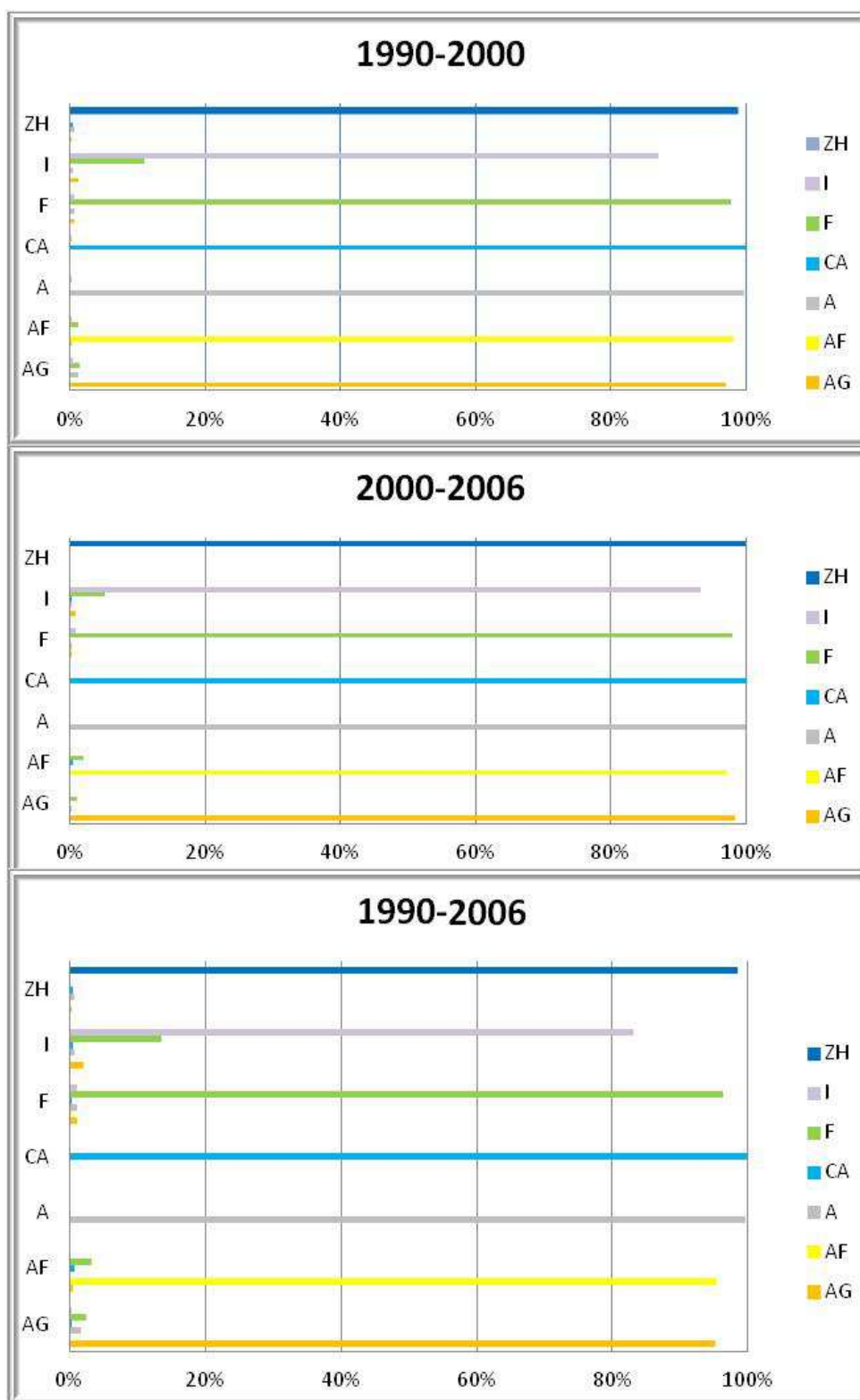


Figura 10 - Gráficos de Ganho e Perdas entre classes para os períodos 1990-2000, 2000-2006 e 1990-2006 (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Florestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)

A tabela 9 mostra as mudanças ocorridas no período de 1980 a 1995, 1995 a 2010 e 1980 a 2010 analisando as unidades amostrais LANDYN. O valor total das alterações de uso e ocupação do solo são equivalentes para os períodos entre 1980 a 1995 e 1995 a 2010 (12,49% e 12,9%, respetivamente). Entre 1980 e 2010 o total de alterações foi de cerca de 20%. Em todos os períodos, é de salientar a variação positiva importante da classe "artificializados".

De 1980 a 1995, a classe "florestas" perdeu 8% da sua área para a classe "incultos", sendo também notória a perda de solo agrícola para solo inculto (4%) e florestal (4%). De 1995 a 2010, destaca-se o aumento da classe "corpos de água" devido à construção de novas barragens (29,3%). Entre 1995 e 2010, verificou-se uma mudança importante da classe "incultos" para a classe "florestas" (17%). Mais uma vez, é notória a perda de solo agrícola (-7,7%) neste período. Entre 1980 e 2010, destaca-se uma elevada transição de uso e ocupação do solo das classes "agrícolas" para "florestais" (9%) e de "incultos" para "florestais" (24,2%). A classe "artificializados" foi a que mais aumentou neste período (63,1%). Na figura 11 pode-se constatar as transições descritas acima, onde se define os ganhos e perdas de um período para outro em cada uma das classes.

Classes	Δ 1980-1995	Δ 1995-2010	Δ 1980-2010
Agrícolas	-5,27%	-7,66%	-12,52%
Agroflorestais	-8,02%	-4,72%	-12,36%
Artificializados	25,78%	29,67%	63,10%
Corpos de água	1,80%	29,32%	31,66%
Florestas	6,40%	6,95%	10,07%
Incultos	8,24%	-2,02%	6,05%
Zonas Húmidas	4,60%	0,00%	4,60%
Total	12,49%	12,90%	20,29%

Tabela 9 - Gráfico de Mudanças - Dados Unidades Amostrais LANDYN

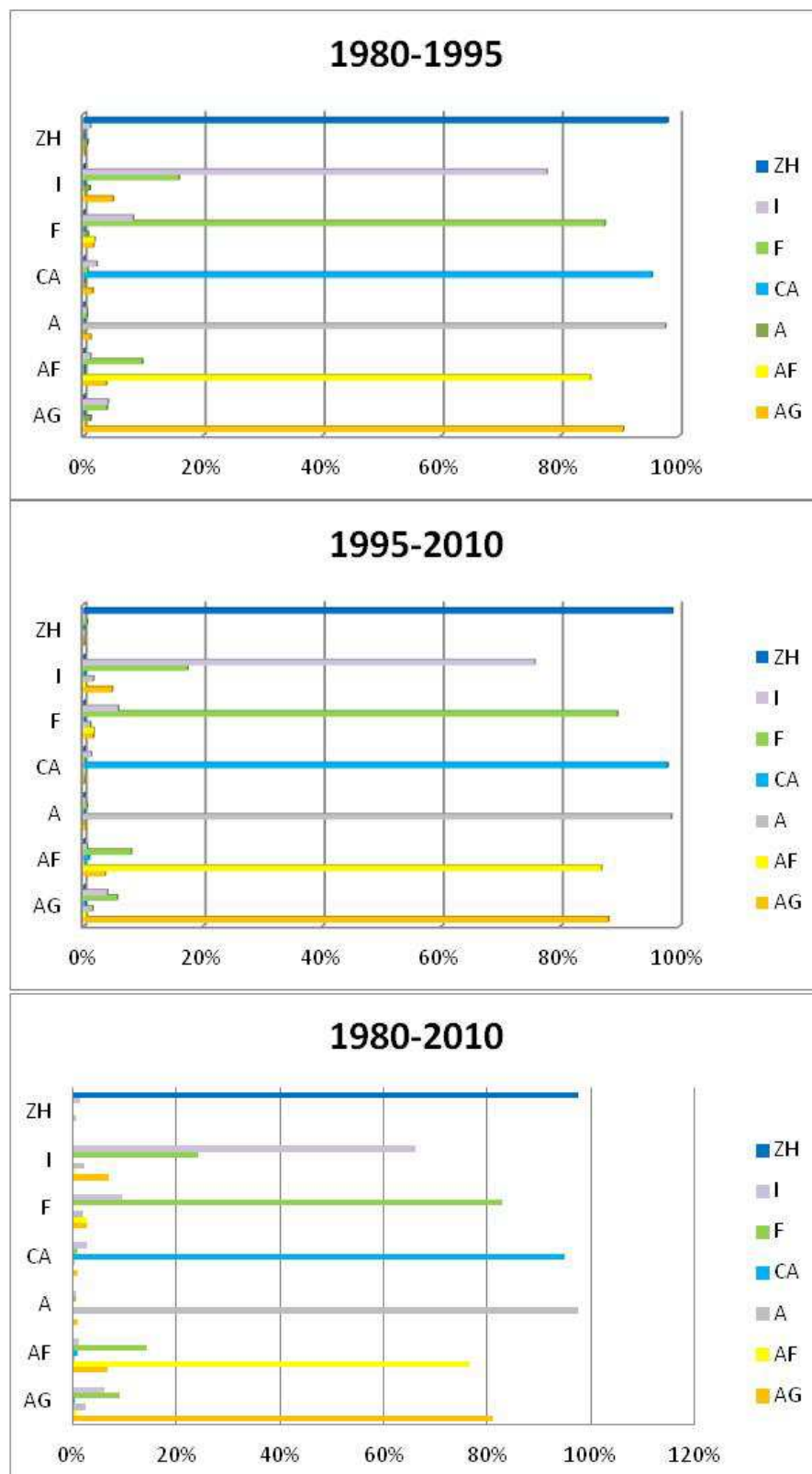


Figura 11 - Gráfico de Ganho e Perdas entre classes para os períodos 1980-1995, 1995-2010 e 1980-2010 (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Florestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)

O valor do χ^2 obtido para medir a associação entre a tabela de contingência 1990-2006 e a equação de Chapman-Kolmogorov é de 0,270314. No caso da tabela de contingência de 1980-2010, o valor do χ^2 é de 0,3226889. Os valores de χ^2 encontram-se abaixo do valor crítico da distribuição, para um nível de significância de 0.995 que é 17,887 para $(7 - 1)^2$ graus de liberdade. Este resultado permite concluir que, o processo de alteração de uso e ocupação do solo é um processo markoviano na área de estudo (Cabral et al. 2014; Santos et. al 2014). Com base nos valores obtidos, realizaram-se as projeções de uso e ocupação do solo para 2010, 2020, 2030 e 2040 (Tabelas 10,11,12,13,14 e 15) com base na matriz de transição 1990-2000 e com base na matriz de transição 1995-2010 (Takada et al. 2010).

		2010									
2020	Classes	AG	AF	A	CA	F	I	ZH	Total	Δ	$\Delta \%$
	AG	141774	2988	256	61	4746	5195	0	155020	-19872	-11%
	AF	1048	33574	0	0	4558	232	0	39412	-4457	-10%
	A	4552	127	24180	20	3307	1676	8	33870	9090	37%
	CA	657	404	24	5615	278	179	0	7157	1243	21%
	F	15846	6291	173	51	143308	18371	0	184040	11084	6%
	I	11000	485	147	166	16742	50352	18	78910	2860	4%
	ZH	15	0	0	1	17	45	1110	1188	52	105%
	Total	174892	43869	24780	5914	172956	76050	1136	499597	99684	20%

Tabela 10 – Previsões para 2020 – dados Unidades Amostrais LANDYN (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)

	2010										
	Classes	AG	AF	A	CA	F	I	ZH	Total	Δ	Δ %
2030	AG	147712	2031	111	6	3666	4666	0	158192	-16701	-10%
	AF	1049	36354	1	5	3806	345	0	41560	-2309	-5%
	A	3410	97	24337	31	2535	1637	4	32051	7271	29%
	CA	814	500	31	5759	350	133	0	7587	1673	28%
	F	12930	4545	187	19	149670	17079	8	184438	11482	7%
	I	8962	342	113	94	12929	52190	5	74635	-1415	-2%
	ZH	16	0	0	0	0	0	1119	1135	-1	0%
	Total	174893	43869	24780	5914	172956	76050	1136	499598	82457	17%

Tabela 11 - Previsões para 2030 – dados Unidades Amostrais LANDYN (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)

	2010										
	Classes	AG	AF	A	CA	F	I	ZH	Total	Δ	Δ %
2040	AG	136356	2800	164	11	5514	6145	0	150990	-23901	-14%
	AF	1573	33206	3	8	5216	646	0	40652	-3217	-7%
	A	5034	189	24122	47	3799	2365	6	35562	10782	44%
	CA	1182	716	47	5684	540	208	0	8377	2462	42%
	F	18782	6292	283	38	141150	22156	12	188713	15756	9%
	I	11942	666	161	127	16738	44531	7	74172	-1879	-2%
	ZH	22	0	0	0	0	0	1110	1132	-3	0%
	Total	174891	43869	24780	5915	172957	76051	1135	499598	113439	23%

Tabela 12- Previsões para 2040 – dados Unidades Amostrais LANDYN (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)

	2000										
	Classes	AG	AF	A	CA	F	I	ZH	Total	Δ	Δ %
2020	AG	3400573	4931	137	279	49707	22119	127	3477873	-144011	-4%
	AF	1666	605797	1	48	8468	879	0	616859	-11864	-2%
	A	87805	1038	280552	311	42247	8576	346	420875	138444	33%
	CA	7079	1202	142	2515460	2076	2503	270	2528732	10433	0%
	F	103866	15535	898	114	3255744	173471	1	3549629	151163	4%
	I	20510	220	690	1906	40203	649110	0	712639	-144092	-20%
	ZH	385	0	11	181	21	73	27927	28598	-73	0%
	Total	3621884	628723	282431	2518299	3398466	856731	28671	11335205	600042	5%

Tabela 13- Previsões para 2020 – dados CLC (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)

	2000										
	Classes	AG	AF	A	CA	F	I	ZH	Total	Δ	Δ %
2030	AG	3295854	7304	214	431	73049	31555	186	3408593	-213291	-0,06257
	AF	2544	594665	2	72	12474	1399	0	611156	-17568	-3%
	A	130022	1660	279626	477	63208	13087	515	488595	206164	42%
	CA	10518	1793	214	2514045	3176	3576	402	2533724	15426	1%
	F	153484	22910	1386	325	3190556	241095	4	3609760	211296	6%
	I	28895	391	973	2678	55966	565916	1	654820	-201912	-31%
	ZH	567	1	16	270	35	104	27562	28555	-115	0%
	Total	3621884	628724	282431	2518298	3398464	856732	28670	11335203	866979	8%

Tabela 14 - Previsões para 2030 – dados CLC (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)

2000											
2040	Classes	AG	AF	A	CA	F	I	ZH	Total	Δ	Δ %
	AG	3194892	9615	295	592	95414	40075	243	3341126	-280757	-8%
	AF	3450	583748	4	97	16336	1956	0	605591	-23133	-4%
	A	171165	2347	278708	650	84060	17712	683	555325	272896	49%
	CA	13891	2379	286	2512632	4314	4552	533	2538587	20288	1%
	F	201497	30040	1895	619	3128926	298302	7	3661286	262822	7%
	I	36246	594	1220	3351	69363	494004	3	604781	-251951	-42%
	ZH	742	1	21	358	51	131	27202	28506	-165	-1%
	Total	3621883	628724	282429	2518299	3398464	856732	28671	11335202	1115090	10%

Tabela 15 - Previsões para 2040 – dados CLC (AG: Agrícolas; AF: Agroflorestais; A:Artificializados; CA: Corpos de água; F:Forestas; I: Incultos; ZH: Zonas Húmidas)

Utilizando as unidades amostrais como dados, calculou-se ainda as projeções para as cinco regiões de Portugal Continental NUTS II (Norte, Centro, Lisboa, Alentejo e Algarve), para tal foi necessário verificar, se para cada região o processo de alteração de uso e ocupação do solo é um processo markoviano. Analisando região a região verificou-se que o valor do χ^2 (Tabela 16) é inferior ao valor crítico da distribuição para o mesmo nível de significância e graus de liberdade (Cabral et al. 2014; Santos et. al 2014).

Região	χ^2
Norte	3.828
Centro	7.208
Lisboa	2.851
Alentejo	1.662
Algarve	2.514

Tabela 16 - Valor de χ^2 para as NUTS II

Para o cálculo das projeções utilizou-se o comando MARKOV do software IDRISI SELVA. Este comando, analisa um par imagens de uso e ocupação do solo para dois momentos distintos, onde se obtém após o processo a matriz de probabilidades, a matriz das áreas de transição e a visualização dessas transições para cada classe representada.

3.1.1. Análise das Alterações de uso e ocupação do solo

Nos dois gráficos pode-se constatar que a área agrícola diminui tal como seria de esperar, assim como o aumento das classes “artificializados” e classes “florestais”. Embora as mudanças estudadas digam respeito a dados e a períodos diferentes, as projeções coincidem, apesar de valores diferentes. Pode-se constatar que a tendência de mudança se reflete nos diferentes tipos de dados.

3.1.2. Análise do Período 1990-2040

A percentagem de área agrícola como se pode verificar na figura 12 irá diminuir até 2040 (29%), em 1990 a área agrícola representava 32% do território. Em termos de aumento destaca-se a classe “florestas” que teve um crescimento ao longo das várias décadas, tal como a classe artificializados.

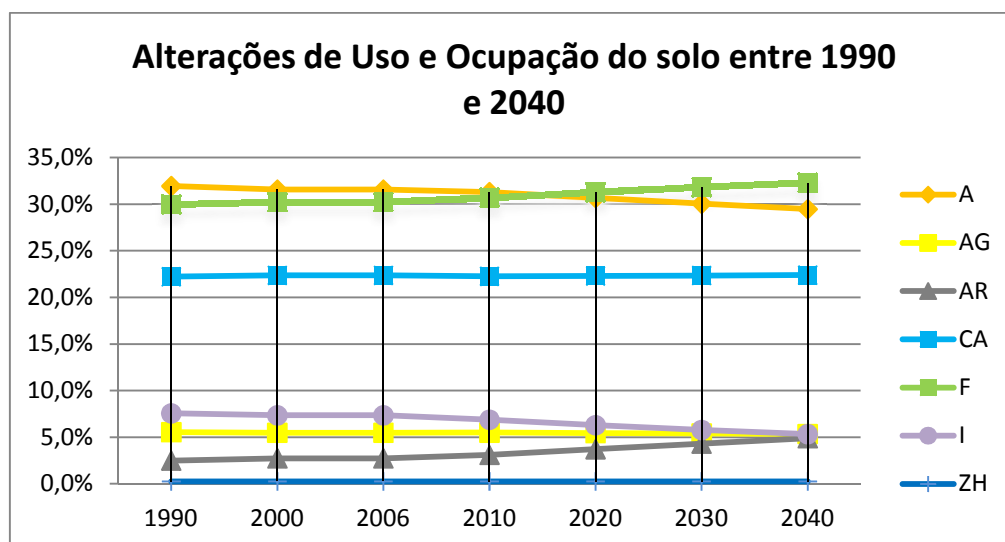


Figura 12 - Alterações de Uso e Ocupação do solo entre 1990 a 2040

3.1.3. Análise Período 1980-2040

A percentagem de área ocupada pela classe agrícola irá diminuir de uma maneira bastante importante até 2040. Prevê-se que esta classe ocupe apenas 30,1% do território quando, em 1980 representava 39,3%.

Este declínio, é feito principalmente à custa do aumento das classes "artificializados" e "florestas" que aumentam significativamente o seu peso no uso e ocupação do solo. De notar também, a diminuição ligeira mas consistente da classe "agroflorestais" de 1980 a 2040 (Figura 13).

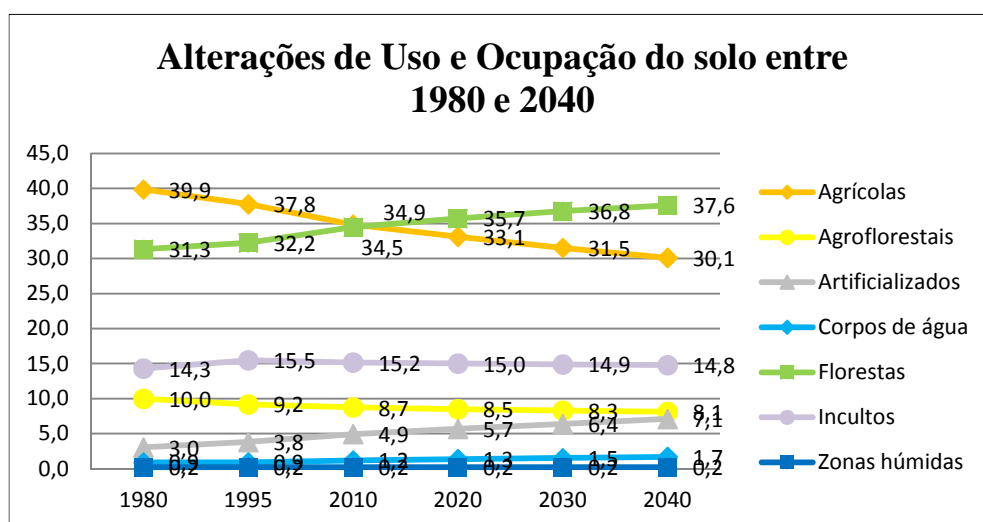


Figura 13- Alterações de Uso e Ocupação do solo entre 1980 a 2040

3.1.4. Análise NUTS II

Uma vez analisadas as mudanças e projeções quantitativas a nível de Portugal Continental, não será menos importante analisar essas mesmas mudanças para cada NUTS II (Norte, Centro, Lisboa, Alentejo e Algarve), onde se pode constatar na figura 14.

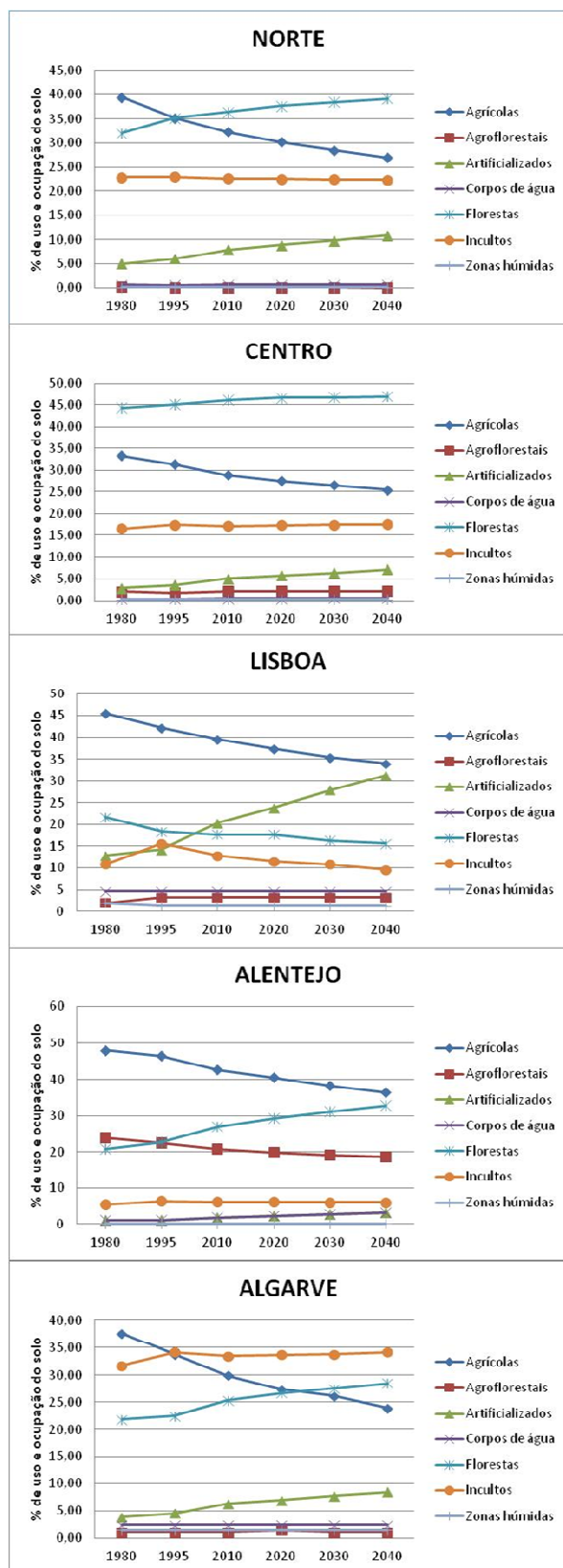


Figura 14- Alterações de Uso e Ocupação do Solo nas NUTS II

Em 2040 31,3% do uso e cobertura do solo da terra na região de Lisboa será “artificializado”, isto representa um grande aumento quando comparado com 1980, altura em que esta classe ocupava 12,9% da área total da região. As áreas artificializadas aumentam em todas as regiões, sendo na região de Lisboa que se verificou o maior aumento.

A diminuição da classe “agrícola” é comum para as 5 regiões, no entanto, essa diminuição destaca-se sobretudo na região do Algarve, onde diminuiu de cerca 37% em 1980 para cerca de 24% em 2040.

A região de Lisboa é a única onde a classe “florestas” diminui, podendo-se destacar a região do Alentejo onde o aumento da classe florestas é o maior das cinco regiões, em 2040 espera-se uma ocupação de cerca de 33% da área total da região.

A classe “zonas húmidas” não tem sofrido quaisquer alterações ao longo dos anos, fato que se verifica nas cinco regiões, já a classe “corpos de água” aumenta significativamente no período entre 1995 a 2010 na região do Alentejo, este aumento deve-se à construção da barragem do Alqueva nesta região.

3.2. Projeção espacial de uso e ocupação do solo para 2040

A validação da projeção realizada para o ano 2010 foi considerada positiva. Utilizando o modelo Markov e AC, o valor obtido para o erro de discordância devido à quantidade foi de 9,7% e o erro de discordância devido à localização na grelha foi de 22,44%. Utilizando o modelo RL, o valor do erro de discordância devido à quantidade foi de 10% e devido à localização foi de 22,14%. Estes valores embora ligeiramente superiores, são muito próximos dos valores obtidos pelo modelo nulo (Tabela 17), i.e., um modelo em que se compara o mapa de 2000 com o mapa de 2010 (erro de discordância devido à quantidade de 9,7% e erro de discordância devido à localização de 21,89%).

Componente	CA_MARKOV	Regressão Logística e CA_MARKOV	Valor Nulo
AgreementChance (concordância devido ao acaso)	14,3%	14,3%	14,3%
AgreementQuantity (concordância devido a quantidade)	15,4%	15,5%	15,5%
Agreement Strata (concordância devido ao localização ao nível da estratificação)	0,0%	0,0%	0,0%
AgreementGridcell (concordância devido ao localização ao nível da célula na grelha)	38,2%	37,95	38,6%
DisagreeGridcell (discordância devido à localização ao nível da célula na grelha)	22,4%	22,14%	21,9%
DisagreeStrata (discordância devido à localização ao nível da estratificação)	0,0%	0,0%	0,0%
DisagreeQuantity (discordância devido à quantidade)	9,7%	10%	9,7%

Tabela 17- Resultados dos valores das componentes do Modelo de Validação

Após a validação dos mapas e analisando a tabela 17, pode-se concluir que estamos perante uma boa simulação. Com base nestes dados permite-nos simular diferentes cenários para períodos futuros.

Contudo, no que se refere à validação os valores de concordância e discordância não são muito diferentes. Para a simulação dos cenários optou-se pelo modelo cadeias de Markov e AC, uma vez que o modelo com RL é mais interessante se utilizarmos variáveis independentes como a área ardida, rede viária, declives, etc. Ao contrário do modelo AC, o modelo de RL não é explícito em termos temporais, i.e., o resultado apenas indica onde as mudanças irão ocorrer mas não quando irá acontecer (Hu 2007).

3.3. Cenários

A elaboração de cenários constitui uma excelente estratégia no que diz respeito ao planeamento futuro, baseado no passado. Os cenários criados são uma ótima base para a tomada de decisões, no que respeita às estratégias de planeamento de ordenamento do território, assim como nas tomadas de decisão para outras áreas que estejam direta ou indiretamente ligadas ao uso e ocupação do solo. A possibilidade de se poder “fazer planos” a longo prazo, deverá ser uma boa preparação para as alterações que na realidade irão ocorrer. Embora os cenários possam ser pensados de uma forma estratégica ou até mesmo utópica, haverá sempre um fundo de verdade uma vez que são obtidos através de dados reais.

O mapa de 2040 (Figura 15), estimado com as mesmas probabilidades condicionais de transição e o mesmo mapa de aptidão que foram utilizados para simular 2010, é considerado o cenário de referência business-as-usual (BAU), onde se poderá esperar que em 2040 a classe “agrícola” ocupe 30% do território. 33%, será a fração ocupada pela classe “florestas”. As classes “agroflorestais”, “artificializados” e “incultos” rondarão os 5%. A classe “corpos de água” em 2040 ocupará 22%, enquanto a classe “zonas húmidas” não chegará a 1%.

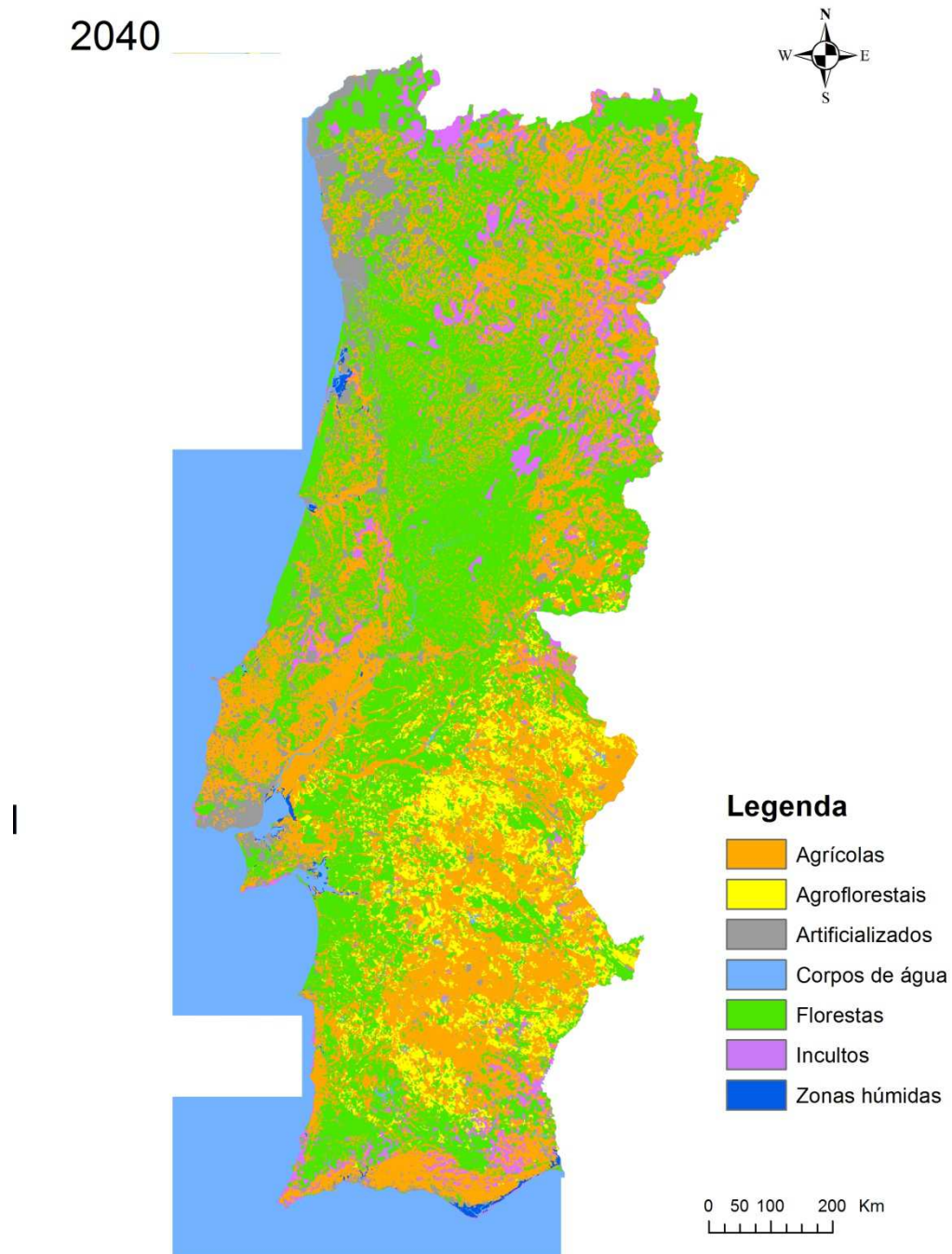


Figura 15 - Mapa de previsão para 2040

Para efetuar a simulação de cada cenário, é necessário utilizar o ficheiro. txt correspondente ao resultado obtido pelo modelo CA_MARKOV com o número de pixéis de cada classe “transition_areas.txt” para 2040, onde se alteraram manualmente o número de pixéis para cada classe, de forma a que o número total de pixéis não sofra graves oscilações.

Na tabela 18 são discriminados as alterações efetuados ao número de pixéis para os três cenários simulados e para o cenário BAU.

Classes	2040 (BAU)	Cenário de Sustentabilidade Ambiental	Cenário de Desenvolvimento Industrial	Cenário de Desertificação
Agrícolas	3345913	2907713	4059963	3077616
Agroflorestais	611145	566224	741924	310644
Artificializados	554430	451310	638600	776257
Corpos de água	2518636	2538079	2517559	2551318
Florestais	3687233	4467025	2809255	3592878
Incultos	590426	376412	540312	1000369
Zonas húmidas	27955	28441	27591	28240

Tabela 18 - Proporção de cada classe

Considerando três situações distintas mas possíveis de acontecer futuramente foram elaborados três cenários hipotéticos para Portugal Continental: (i) cenário de Sustentabilidade Ambiental (Figura 16) onde se projeta um aumento significativo da classe “florestas” (+21%) e uma diminuição dos terrenos agrícolas (cerca de -13%) e da classe de “incultos” (cerca de -36%); (ii) cenário de Desenvolvimento Industrial (Figura 17) onde se projeta um aumento das classes “agrícolas” (+21%), da classe de “agroflorestais” e da classe “artificializados” (+21% e +15% respetivamente). Neste cenário, a classes florestal diminui cerca de 24%; e (iii) Cenário de Desertificação (Figura 18) onde a maior projeção recai no aumento da classe de “incultos” (+69%) e “artificializados” (+40%), diminuindo sobretudo as classes “agrícola” (-8%) e “agroflorestal” (-49%).

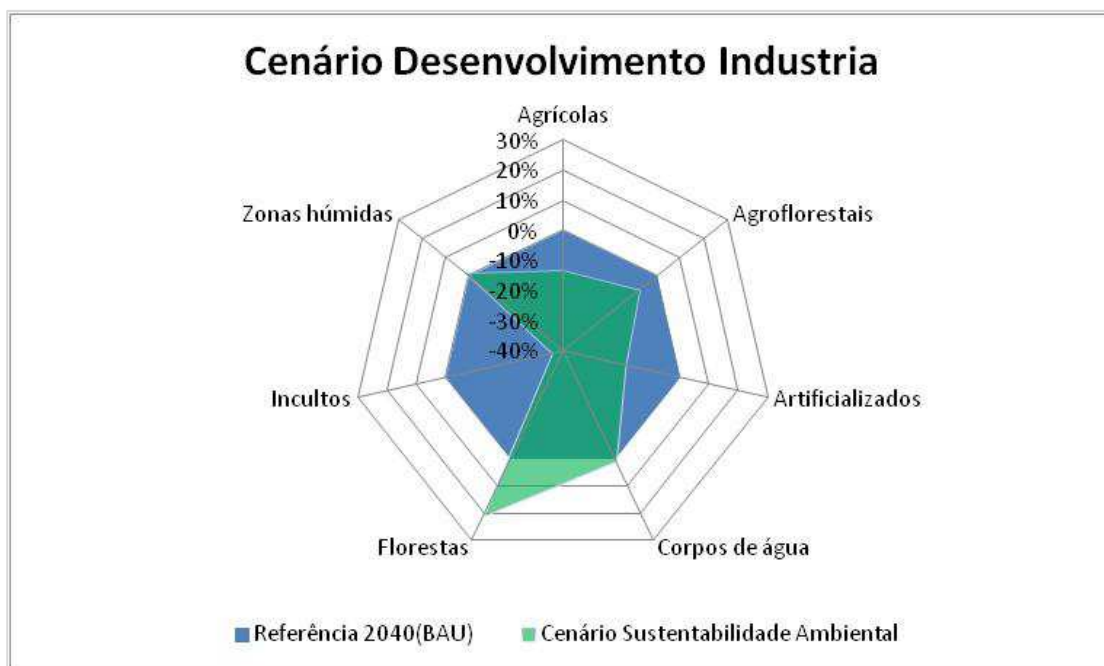


Figura 16 - Alteração do Cenário Sustentabilidade Ambiental relativamente ao mapa de referência

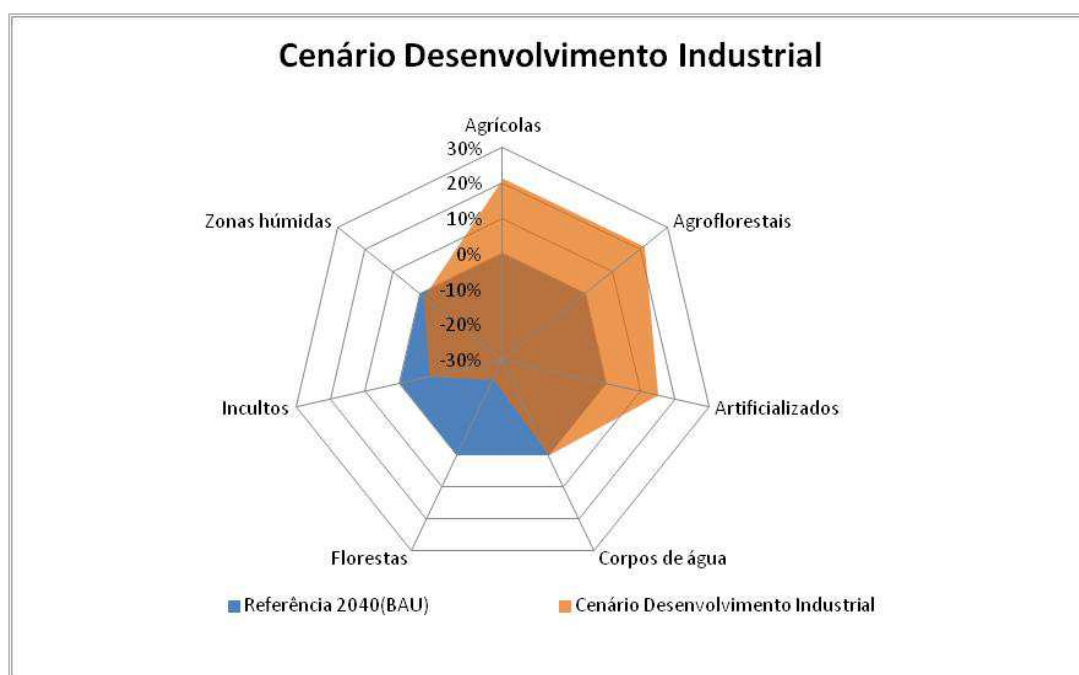


Figura 17 - Alteração do Cenário Desenvolvimento Industrial relativamente ao mapa de referência

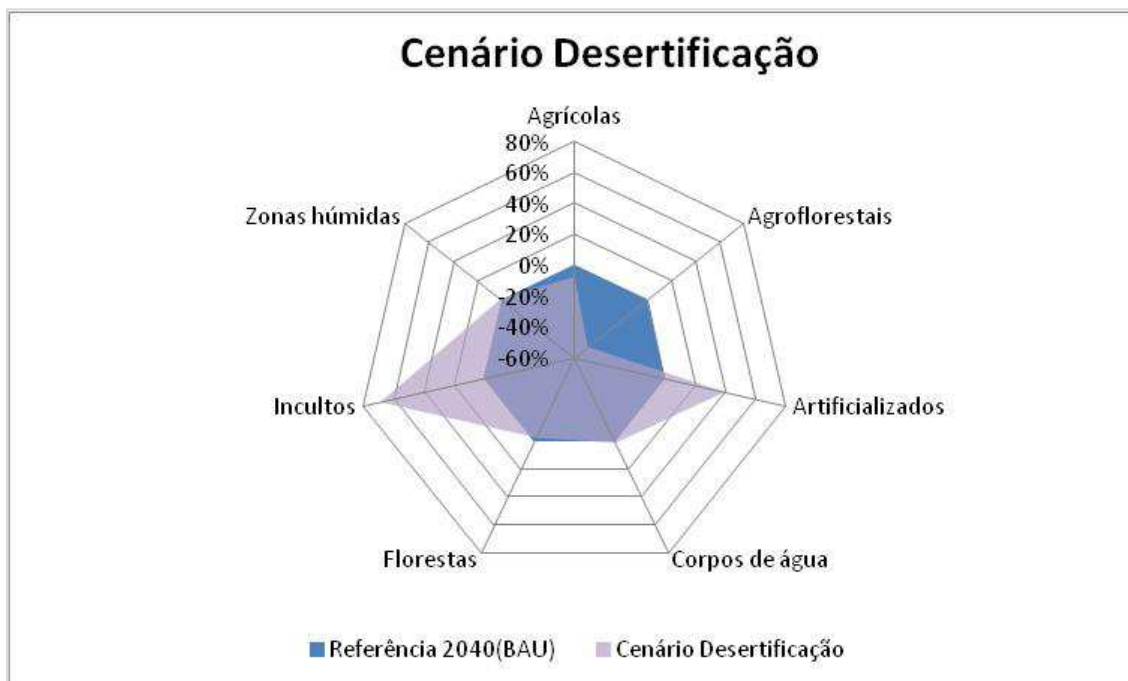


Figura 18 - Alteração do Cenário de Desertificação relativamente ao mapa de referência

As simulações dos três cenários prendem-se sobretudo com a ideia de cenários extremos, onde existe sobretudo uma discrepância entre áreas de pelo menos duas classes, como por exemplo, no cenário de sustentabilidade ambiental onde existe um aumento considerável da classe floresta e uma diminuição da classe agrícola.

A ideia destes cenários será sobretudo auxiliar os responsáveis de planeamento, tendo em conta diferentes tipos de cenários, que tornará mais fácil simular diferentes estratégias, de forma a manipular determinados parâmetros. Sendo estes parâmetros também dinâmicos, os quais também se podem simular, como é o caso do clima, das catástrofes naturais, da demografia, da economia entre outros fatores que influenciam direta e/ou indiretamente as mudanças no uso e ocupação do solo. Serão sem dúvida uma boa ferramenta para definir estratégias futuras de forma a manipular determinados padrões ou tendências, que tendo em conta a condicionante “passado”, possam ser alterados de forma a estruturar novos padrões que possam ser mais vantajosos.

3.3.1.Cenário de Sustentabilidade Ambiental

A nível europeu têm sido adotadas medidas estratégicas de avaliação ambiental para o planeamento da paisagem, cuja tarefa é verificar a compatibilidade das transformações territoriais, em relação aos seus níveis de vulnerabilidade, de forma a avaliar possíveis cenários futuros como consequência de intervenção, verificando se eles estão em linha com a preservação e valorização do meio ambiente.

As metodologias para a paisagem de sucesso e planeamento ambiental, têm sido severamente desafiadas quando conceitos como a preservação dos ecossistemas e da sustentabilidade são questionados. O desafio atual é a construção de ferramentas de tomada de decisão transparentes e flexíveis para serem usadas no planeamento ambiental e abraçar uma ampla gama de necessidades das partes interessadas, juntamente com os requisitos de gestão da paisagem. O processo de tomada de decisão deve-se ao uso de modelos interdisciplinares. Uma abordagem moderna para o estudo da paisagem mostra que não deve ser visto como uma mera soma das partes, mas como um sistema de relações entre os diferentes ecossistemas constituintes e processos que determinam a sua evolução no tempo (Lauro 2013).

A simulação deste cenário teve como objetivo uma visão mais ambientalista, aumentando sobretudo a mancha florestal, para tal diminuirá a área agrícola, mantendo-se a classe de “artificializados” ou a mancha urbana quase inalterada. Em termos espaciais, podemos verificar em comparação com o mapa BAU que a região onde se verifica maior aumento da mancha florestal é nas regiões do Norte e Centro, tal como acontece no mapa de referência. Pode-se verificar na figura 19, o resultado espacial do cenário de sustentabilidade ambiental.

Cenário de Sustentabilidade Ambiental

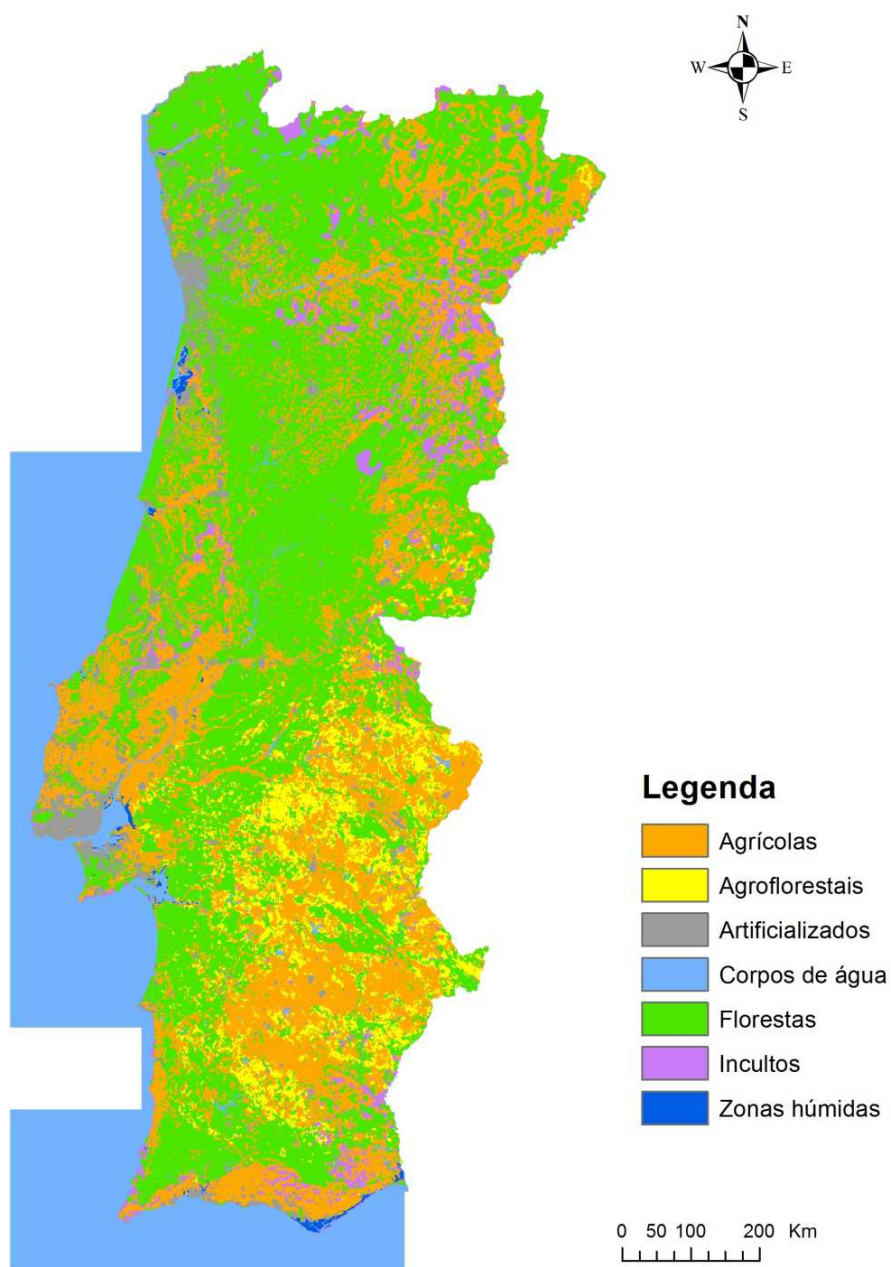


Figura 19- Cenário de Sustentabilidade Ambiental

3.3.2. Cenário de Desenvolvimento Industrial

A simulação de cenários de uso e ocupação do solo tem sido bastante utilizada, não só para o planeamento do ordenamento do território mas também para modelos de avaliação económica (Verburg et al. 2006). Na esperança de um país mais industrializado, que permita o decréscimo das disparidades sociais diminuindo assim o desemprego, simulou-se o cenário de Desenvolvimento Industrial, aumentando assim as áreas agrícolas e as áreas agroflorestais.

O cenário de Desenvolvimento Industrial, pode ser um bom contributo para estudos económicos do país, uma vez que a Agricultura e a atividade Agroflorestal têm um papel importante no PIB.

O facto de neste cenário se verificar um aumento das classes “agrícola” e “agroflorestal”, poderá ter um impacto no aumento da exportação proveniente de produtos obtidos pelo aumento das atividades económicas relacionadas com este tipo de uso e ocupação do solo. Neste cenário é na região do Alentejo onde as classes agrícolas e agroflorestais mais se concentram, fenómeno que também acontece no mapa BAU e que também acontece nos dias de hoje. No entanto neste cenário verifica-se um grande aumento da classe “agrícola” na região Norte, como se pode verificar na figura 20.

Cenário de Desenvolvimento Industrial

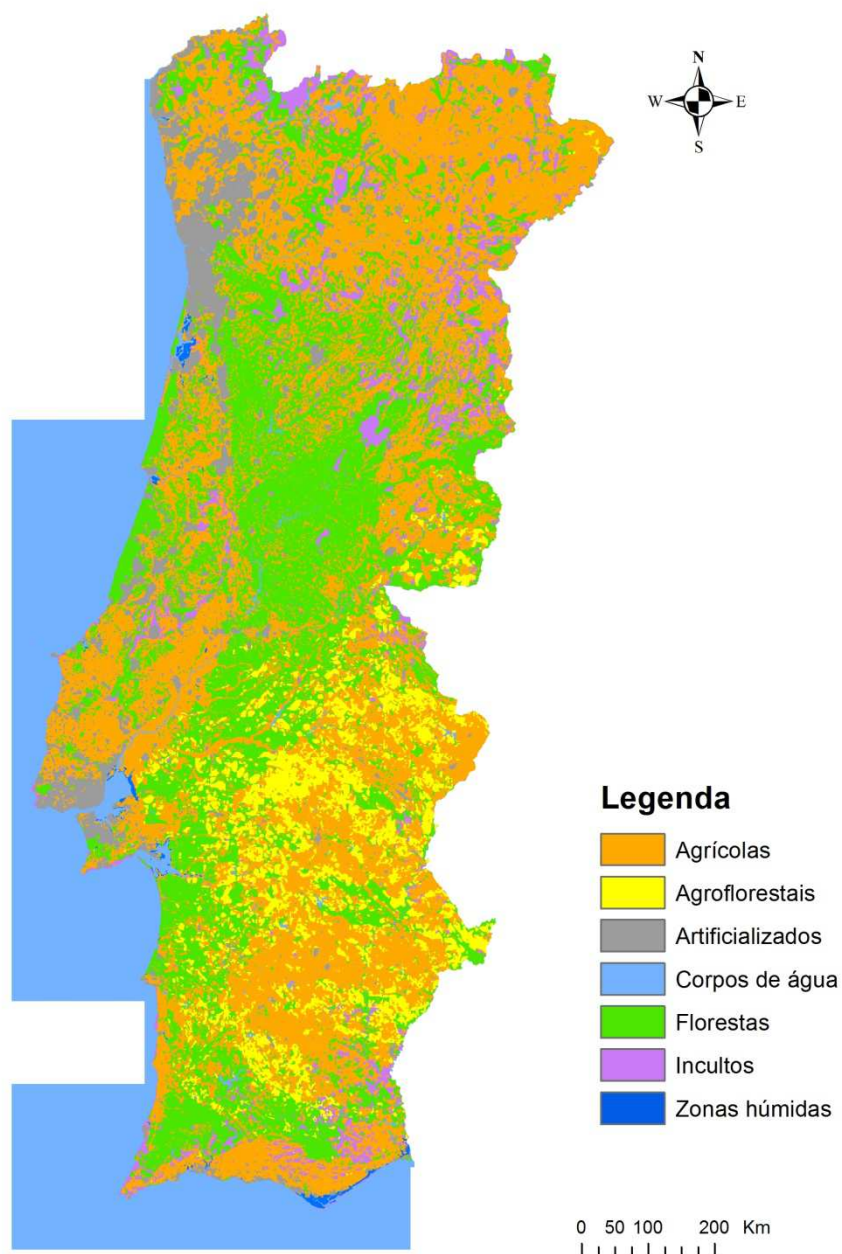


Figura 20- Cenário Desenvolvimento Industrial

3.3.3. Cenário de Desertificação

“A floresta Portuguesa poderá enfrentar uma crise ambiental e económica que arrastará a fronteira da desertificação em Portugal para norte, a não ser que atuem agora no sentido de a adaptar aos cenários de alterações climáticas.” Luís Silva da World Wild Fund for Nature.

A desertificação constitui um motivo real de preocupação para diversos países, entre os quais se encontram Portugal e a generalidade dos países ribeirinhos do Mediterrâneo.

A ameaça de desertificação está hoje claramente associada às alterações climáticas. A desertificação não pode ser entendida como um mero fenómeno biofísico, está normalmente associada à regressão demográfica e ao uso do solo. Estes fatores interagem e agravam-se mutuamente nas suas consequências. Há por isso que encontrar formas de mitigar os efeitos dos fenómenos climáticos, adaptando as atividades humanas ao território e mantendo níveis e modos de utilização compatíveis com a conservação e valorização dos recursos naturais e territoriais. O combate à desertificação é, por isso, também um problema de ordenamento do território (DGOTDU 2014).

A desertificação é um grande problema ambiental, social e económico para muitos países em todas as partes do mundo (Breckle et al. 2001).

Neste cenário é na classe de “incultos” que maior impacto existe, como se pode verificar na figura 16, as áreas de incultos aumentariam cerca de 70%, se estivéssemos perante este cenário, seria na região Norte onde esse aumento seria ainda mais notório, tal fato é bem visível na figura 21 que mostra de forma espacial a distribuição das classes de uso e ocupação do solo.

Cenário de Desertificação

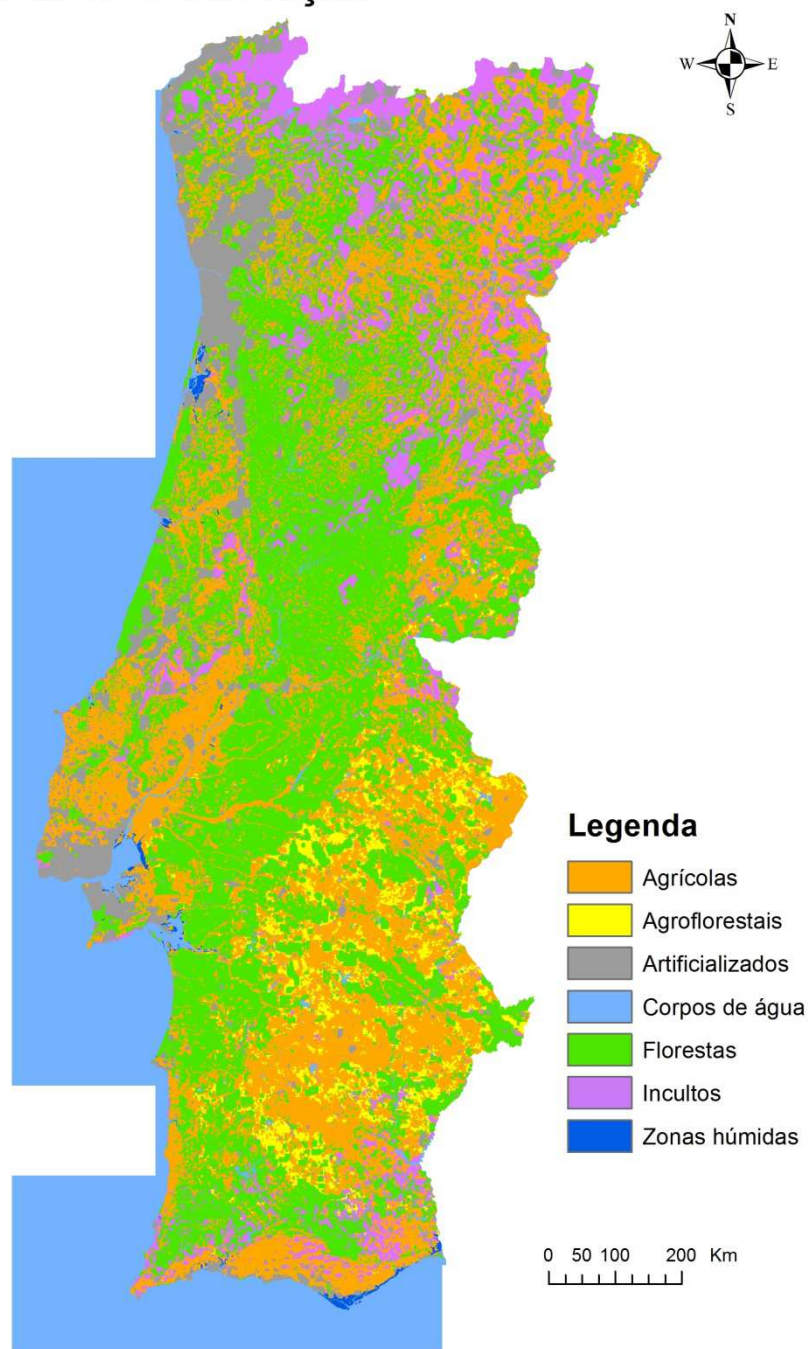


Figura 21- Cenário de Desertificação

4. CONCLUSÕES

O trabalho aqui realizado incidiu sobre as amostras criadas no âmbito do projeto LANDYN para os anos de 1980, 1995 e 2010. As alterações de uso e ocupação do solo seguiram neste período temporal um processo de Markov, sendo portanto, possível prever as suas alterações futuras pressupondo que as alterações ocorridas não são estacionárias ao longo do tempo. Os resultados obtidos podem ser extrapolados para a totalidade de Portugal Continental dentro dos limites de confiança previstos pela amostragem.

A modelação estocástica com base em cadeias de Markov apesar de ser uma ferramenta de planeamento útil merece, no entanto, algumas reservas. A utilização da modelação baseada em matrizes de transição de um período de tempo, pode levar a projeções erróneas de curto prazo ou sem continuidade temporal. Fatores económicos cíclicos, políticas de desenvolvimento específicas, catástrofes naturais, desenvolvimento de infraestruturas como o Alqueva, ou outros fatores, podem comprometer a estacionariedade necessária ao sucesso das previsões deste tipo de modelação. Portanto, estes resultados são para usar como qualquer outro tipo de modelo, com a precaução devida, uma vez que as cadeias de Markov não incorporam a autocorrelação espacial para prever alterações futuras. Assim é necessário combinar as transições de Markov com modelos espacialmente explícitos.

Como componente espacial testaram-se dois modelos diferentes: (I) RL e combinação de (II) cadeias de Markov com modelos AC. Contudo a RL, foi apenas utilizada como input no processo CA_MARKOV do IDRISI SELVA. O modelo RL é bastante utilizado, quando se utiliza variáveis independentes que influenciem as dinâmicas do uso e ocupação do solo, sendo que no projeto desenvolvido não foram consideradas condicionantes biofísicas ou socioeconómicas. Os dois modelos foram validados e os resultados obtidos mostraram-se bastante satisfatórios. Assim, tendo em conta a não utilização das variáveis independentes e os resultados de validação entre os modelos não muito diferentes, optou-se pela combinação de Markov e AC. Este modelo revelou-se vantajoso, pois permitiu incluir a componente espacial nas projeções das alterações futuras de uso e ocupação do solo.

Pode-se constatar que em 2040 haverá um aumento da área florestal e um decréscimo da área agrícola, as zonas artificializadas também aumentão prevendo-se esse aumento nas zonas de Lisboa e Porto, como já hoje acontece. As restantes classes permanecerão praticamente inalteradas.

De acordo com as previsões obtidas para o ano de 2040, utilizou-se o mesmo mapa, como mapa de referência para a simulação de cenários, o mapa *Business As Usual*.

Os cenários apresentados são uma abordagem interessante para se poder antecipar tendências Para entender melhor os processos atuais, induzidos pelas mudança da

ocupação e uso do solo, é cada vez mais importante focar-se no desenvolvimento de modelos dinâmicos. Estes modelos tentam replicar diferentes cenários de uma evolução e avaliar as implicações dessa evolução. A principal dificuldade de lidar com processos evolutivos e de mudança como é a ocupação do solo, são as condicionantes que interferem nas próprias mudanças como fatores socioeconómicos e demográficos, contudo estas condicionantes também sofrem alterações ao longo do tempo. O fato de se tratar de processos dinâmicos impede assim a antevisão do planeamento por parte dos decisores políticos e responsáveis de planeamento.

Por isso, a importância de modelos que permitem a previsão e simulação de diferentes cenários a curto e longo prazo, permitindo assim avaliar e definir diferentes estratégias fundamentadas.

As principais limitações nestes processos são a certeza dos modelos, o fato deste projeto não ter tido em conta as condicionantes que direta ou indiretamente influenciam as alterações do solo e afetam a precisão do modelo. Contudo estes modelos baseiam-se nas alterações de uso e ocupação do solo de anos anteriores, este parâmetro é um fator importante uma vez que os dados utilizados são dados reais.

A simulação de uso e ocupação do solo elaborada para esta dissertação, não teria sido possível sem se recorrer à utilização dos SIG. O pré-processamento dos dados e a reclassificação das classes utilizadas foram elaborados em ambiente SIG, sem estes procedimentos não seria possível realizar o restante trabalho. Todos os resultados obtidos nas tabelas de transição foram obtidos com a utilização de dados *raster*. Estes são parte integrante dos SIG e são muito utilizados em modelação espacial com AC. Os AC representam o espaço na forma *raster*, no qual cada célula possui somente um estado de cada vez, dentro de uma série de estados, que definem os atributos do sistema que podem mudar ao longo do tempo, onde se dá transformação do estado de uma célula para outra, ou a célula mantém o mesmo estado de acordo com o estado da vizinhança, o que resulta nas tabelas de transição, que nos mostram as células alteradas e as que permanecem (Clarke 1994).

Apesar de todos os avanços nos modelos AC e a facilidade que existe em conjugar estes modelos com os SIG ainda existem limitações implícitas (Rocha 2012), a implementação dos mesmos nomeadamente na utilização dos dados *raster* que embora sejam muito vantajosos e muito utilizados nos modelos AC, acabam por condicionar o modelo devido à sua falta de precisão e à sua generalização, que são características muito comuns neste tipo de dados.

4.1. Desenvolvimentos Futuros

A simulação dos cenários aqui apresentados, constitui igualmente uma excelente ferramenta de comunicação de políticas alternativas de desenvolvimento e de compreensão de compromissos. Nesta abordagem não foram consideradas variáveis biofísicas, nem socioeconómicas que influenciam as alterações do uso e cobertura da terra. Tais variáveis poderão certamente melhorar a precisão da simulação de novos cenários.

Para além de adicionar variáveis aos cenários simulados de forma a garantir uma maior credibilidade das projeções simuladas, a sua comparação com dados de deteção remota no futuro, será também um ponto de vista interessante para a verificação da precisão dos valores obtidos e com isso perceber, não só a importância de simulação de cenários mas também a sua utilidade para novos estudos que contemplem alterações de uso e ocupação do solo.

Os resultados obtidos neste projeto podem ser úteis para o desempenho de alguns estudos ao nível do ordenamento do território, planeamento urbano, na análise de risco de incêndio, na gestão florestal, integrando assim informação necessária para o desenvolvimento de estratégias importantes para o desenvolvimento de cada área. A par do desenvolvimento dos modelos de simulação, surge a necessidade de integrar diferentes áreas, que tenham a flexibilidade suficiente para se ajustarem às constantes mudanças da realidade e permitir aos diversos intervenientes em matéria de uso do solo gerir eficientemente e equitativamente os seus interesses e os interesses da sociedade (Silva 2002).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-KADER FH. Digital soil mapping at pilot sites in the northwest coast of Egypt: A multinomial logistic regression approach. *World Pumps*. 2011;14(1):29–40.
- AHMED B, AHMED R, ZHU X. Evaluation of Model Validation Techniques in Land Cover Dynamics. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2013 Jun 26;2(3):577–97.
- ALMEIDA MC, BATTY M, VIEIRA MONTEIRO AM, CÂMARA G, SOARES-FILHO BS, CERQUEIRA GC, et al. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2003 Sep;27 (5):481–509.
- ARAYA YH, CABRAL P. Analysis and Modeling of Urban Land Cover Change in Setubal and Sesimbra, Portugal. *Remote Sensing*. 2010 Jun 9;2(6):1549–63.
- ARSANJANI JJ, KAINZ W, MOUSIVAND AJ. Tracking dynamic land-use change using spatially explicit Markov Chain based on cellular automata: the case of Tehran. *International Journal of Image & Data Fusion*. 2011 Dec; 2(4):329–45.
- BATTY M. Cellular Automata and Urban Form: A Primer. *J AM PLANN ASSOC*. 1997 Jun 30;63(2):266–74.
- BENENSON I, TORRENS PM. *Geosimulation: Automata-based Modeling of Urban Phenomena*. John Wiley & Sons; 2004. 320 p.
- BRECKLE S, VESTE M, WUCHERER W. Deserts, land use and desertification. in Breckle SW, Veste M, Wucherer W, eds *Sustainable Land Use in Deserts*: New York: Springer Verlag. 2001;3–13.
- CABRAL P, SANTOS S, ZAMYATIN A, PAINHO M. Uso e Ocupação do Solo em Portugal Continental Avaliação e Cenários Futuros Projeto LANDYN. Lisboa: DGT; 2014. 99-105 p.
- CABRAL P, ZAMYATIN A. Markov Processes in Modeling Land Use and Land Cover Changes in Sintra-Cascais, Portugal [Internet]. *Dyna*. 2009 [cited 2014 Oct 12]. Available from: <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=49612069019>
- CAETANO M, NUNES V, NUNES A. Corine Land Cover 2006 for Continental Portugal, Technical Report. Instituto Geográfico Português. 2009;
- CAETANO M, CARRÃO H, PAINHO M. Alterações da ocupação do solo em Portugal Continental: 1985 – 2000. Instituto do Ambiente, Lisboa, 2005
- CHEN C-F, SON N-T, CHANG N-B, CHEN C-R, CHANG L-Y, VALDEZ M, et al. Multi-Decadal Mangrove Forest Change Detection and Prediction in Honduras, Central America,

with Landsat Imagery and a Markov Chain Model. *Remote Sensing*. 2013 Nov 27;5(12):6408–26.

CLARK LABS. *IDRISI* (version Selva). 2013. <http://www.clarklabs.org/products/idrisi.cfm>.

CLARKE KC, BRASS JA, RIGGAN PJ. A cellular automation model of wildfire propagation and extinction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1994;60((11)):1355–67.

COHEN J. Weighted kappa: Nominal scale agreement provision for scaled disagreement or partial credit. *Psychological Bulletin*. 1968;70 (4):213–20.

COMARAZAMY DE, GONZÁLEZ JE, LUVALL JC, RICKMAN DL, BORNSTEIN RD. Climate Impacts of Land-Cover and Land-Use Changes in Tropical Islands under Conditions of Global Climate Change. *Journal of Climate*. 2013 Mar; 26(5):1535–50.

DECRETO-LEI nº 244/02 *D.R. I Série-A,255 (5-11-2014) 7101 - 7103*

DENDONCKER N, BOGAERT P, ROUNSEVELL M. A statistical method to downscale aggregated land use data and scenarios. *Journal of Land Use Science*. 2006 Dec 14;1(2-4):63–82.

DGOTDU | Portal do Ordenamento do Território e do Urbanismo [Internet]. [cited 2014 Oct 1]. Available from: <http://www.dgotdu.pt/channel.aspx?channelID=F22D0209-3F2D-45E1-81F7-3E3268CE77D8&listaUltimos=1>

DGT. “LANDYN – Alterações de Uso E Ocupação Do Solo Em Portugal Continental: Caracterização, Forças Motrizes E Cenários Futuros.” Relatório Anual 2012-2013. Direção Geral do Território, 2013. Lisboa. <http://landyn.isegi.unl.pt/reports/>.

DGT. DGTerritório - Carta de Uso e Ocupação do Solo de Portugal Continental [Internet]. [cited 2014 Oct 12]. Available from: http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/cartografia_tematica/cos/

EASTMAN JR. *GUIDE to Gis and Image Processing*. Clark University, Worcester, A, USA, 2003.

ERLIEN CM, TUTTLE JP, MCCLEARY AL, MENA CF, WALSH SJ. Complexity Theory and Spatial Simulations of Land Use/Land Cover Dynamics: The Use of “What if” Scenarios for Education, Land Management, and Decision Making. *Geocarto International*. 2006 Dec 1;21(4):67–74.

ESRI. *ArcGIS* (version 10.1). 2013. ESRI. www.esri.com

GAO J, ZHANG Y. Incorporating spectral data into logistic regression model to classify land cover: a case study in Mt. Qomolangma (Everest) National Nature Preserve. *International Journal of Geographical Information Science*. 2012 Feb 27; 26(10):1845–62.

- GARDNER M. Mathematical Games - The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life" - M. Gardner - 1970 [Internet]. 1970 [cited 2014 Sep 8]. Available from: http://ddi.cs.unipotsdam.de/HyFISCH/Produzieren/lis_projekt/proj_gamelife/ConwayScientificAmerican.htm
- HARGROVE WW, GARDNER RH, TURNER MG, ROMME WH, Despain DG. Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes. *Ecological Modelling*. 2000 Dec 5;135 (2–3):243–63.
- HU Z, LO CP. Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2007 Nov;31(6):667–88.
- IACONO M, LEVINSON D, EI-GENEIDY A, WASFI R. Markov Chain Model of Land Use Change in the Twin Cities [Internet]. University of Minnesota: Nexus Research Group; 2012 [cited 2014 Apr 30]. Report No.: 000107. Available from: <http://ideas.repec.org/p/nex/wpaper/markovlu.html>
- KAMUSOKO C, OONO K, NAKAZAWA A, WADA Y, NAKADA R, HOSOKAWA T, et al. Spatial Simulation Modelling of Future Forest Cover Change Scenarios in Luangprabang Province, Lao PDR. *Forests*. 2011 Aug 25;2(3):707–29.
- KARAFYLLIDIS I, THANAILAKIS A. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling*. 1997 Jun 16; 99(1):87–97.
- KARI J. Theory of cellular automata: A survey. *Theoretical Computer Science*. 2005 Apr 15;334(1–3):3–33.
- KELLERT SH. In the Wake of Chaos: Unpredictable Order in Dynamical Systems. University of Chicago Press; 1993. 204. ISBN 0-226-42976-8.
- KEMP K. *Encyclopedia of Geographic Information Science*. SAGE Publications; 2007. 585 p.
- KIJIMA M. *Markov Processes for Stochastic Modeling*. Stochastic Modeling Series. 1997. London: Chapman & Hall
- LAURO G. Simulation Models and GIS Technology in Environmental Planning and Landscape Management. *Journal of Geographic Information System*. 2013;05(03):292–302.
- LETT C, SILBER C, BARRET N. Comparison of a cellular automata network and an individual-based model for the simulation of forest dynamics. *Ecological Modelling*. 1999 Sep 15;121(2–3):277–93.
- LIANG S, KUSTAS W, SCHAEPMAN-STRUB G, LI X. Impacts of Climate Change and Land Use Changes on Land Surface Radiation and Energy Budgets. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2010 Sep;3(3):219–24.
- LIU JG, MASON PJ. *Essential Image Processing and GIS for Remote Sensing*. Wiley-Blackwell, New York, 2009; 450.

MAGUIRE DJ, BATTY M, GOODCHILD MF. GIS, Spatial Analysis, and Modeling. ESRI Press; 2005.

MARTINS B. Os incêndios florestais na alteração do uso e ocupação do solo e a sua relação com a análise da susceptibilidade de ravinamentos: exemplos no norte de Portugal. *Grandes Incêndios Florestais, Erosão, Degradação e Medidas de Recuperação dos Solos*. 2013. 207.

MARTINS VN, CABRAL P, SOUSA, SILVA D. Urban modelling for seismic prone areas: the case study of Vila Franca do Campo (Azores Archipelago, Portugal). *Nat Hazards Earth Syst Sci*. 2012 Sep 3;12(9):2731–41.

MARTINS VN, PIRES R, CABRAL P. Modelling of coastal vulnerability in the stretch between the beaches of Porto de Mós and Falésia, Algarve (Portugal). *J Coast Conserv*. 2012 Dec 1;16(4):503–10.

MATOS J. Fundamentos de Informação Geográfica, Lidel, 2008, 6ª edição

MESSINA JP, WALSH SJ. 2.5D Morphogenesis: modeling landuse and landcover dynamics in the Ecuadorian Amazon. *Plant Ecology*. 2001 Sep 1;156(1):75–88.

MULLER MR, MIDDLETON J. A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada. *Landscape Ecol*. 1994 Jun 1;9(2):151–7.

MURTEIRA BENTO. *Probabilidades E Estatística*. 1990. 2nd ed. Vol. II. McGraw-Hill.

NUNES A. Uso do solo e cobertura vegetal em Portugal Continental: Aspectos gerais da sua evolução. *Cadernos de Geografia*. 2002 Apr;(21/23,):91–103.

OLAYA V. Sistemas de Información Geográfica. Cuadernos internacionales de tecnología para el desarrollo humano. 2009;(8).

ORDÓÑEZ GALÁN C, MARTÍNEZ-Alegría LÓPEZ R. Sistemas de información geográfica: aplicaciones prácticas con Idrisi32 al análisis de riesgos naturales y problemáticas medioambientales. Madrid: Ra-Ma; 2003.

PAINHO M, CAETANO M. Cartografia de ocupação do solo : Portugal continental, 1985-2000 : CORINE Land Cover 2000. Instituto do Ambiente. Amadora; 2006.

PONTIUS RG, MALANSON J. Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *International Journal of Geographical Information Science*. 2005 Feb 1;19(2):243–65.

PONTIUS RG, MILLONES M. Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING*. 2011;32(15).

- PONTIUS RG, SHUSAS E, MCEACHERN M. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2004 Feb;101(2–3):251–68.
- RAMOS IL. Cenários para a paisagem rural: contributo para uma discussão à escala local. *Revista Portuguesa de Estudos Regionais*. 2009; (20):127–35.
- ROCHA JF, TENEDÓRIO JA, ENCARNÇÃO S, PONTES S. Integração de Autómatos Celulares e Redes Neurais em Ambiente SIG para Previsão de Alterações nos Padrões de Uso e Ocupação do Solo. Guimarães; 2004.
- ROCHA JF. Sistemas complexos, modelação e geosimulação da evolução de padrões de uso e ocupação do solo [Internet] [Doutoramento em Geografia Ciências da Informação Geográfica]. [Lisboa]: Universidade de Lisboa Instituto de Geografia e Ordenamento do Território; 2012 [cited 2014 Sep 16]. Available from: https://www.academia.edu/2239968/Sistemas_complexos_modelacao_e_geosimulacao_da_evolucao_de_padroes_de_uso_e_ocupacao_do_solo
- ROSENBERG MS. The Bearing Correlogram: A New Method of Analyzing Directional Spatial Autocorrelation. *Geographical Analysis*. 2000 Jul 1;32(3):267–78.
- SANTOS S, CABRAL P, ZAMYATIN A. Multi-decadal projection and analysis of land cover changes in Portugal from 1980 to 2040. Guimarães: IEEE Computer Society; 2014. p. 99–104.
- SARKAR P. A Brief History of Cellular Automata. *ACM Comput Surv*. 2000 Mar;32(1):80–107.
- SATURNINO HMS. Modelação e mapeamento da probabilidade de incêndio florestal. 2012 [cited 2014 Oct 16]; Available from: <http://repositorio.ipcb.pt/handle/10400.11/1542>
- SCARASSATTI DF, COSTA DC. Modelos Dinâmicos aplicados no Planejamento Urbano para a Cidade de Campinas, Brasil. Universidade do Algarve, Faro; 2010.
- SILVA EA. Cenários da Expansão Urbana na Área Metropolitana de Lisboa. *Revista de Estudos Regionais - Região Lisboa e Vale do Tejo*, 2002, 23 - 41.
- SILVA LN. O sobreiro, uma barreira contra a desertificação. Lisboa; 2008. Available from: <http://naturlink.sapo.pt/Noticias/Noticias/content/O-sobreiro-uma-barreira-contra-a-desertificacao?bl=1>
- SOARES-FILHO BS, COUTINHO CERQUEIRA G, LOPES PENNACHIN C. Dinamica—a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*. 2002 Sep 1;154(3):217–35.

- TAKADA T, MIYAMOTO A, HASEGAWA SF. Derivation of a yearly transition probability matrix for land-use dynamics and its applications. *Landscape Ecol.* 2010 Apr 1;25(4):561–72.
- TENEDÓRIO JA. "Modelos Geográficos e Sistemas Complexos Contributo para a Monotorização da Evolução da Zona Costeira." 2002'
- TENEDÓRIO JA, Rocha J, Encarnação S. e FERREIRA JC. Modelos Geográficos e Sistemas Complexos: Técnicas de Geocomputação aplicadas à previsão de alterações na linha de costa. CD-ROM Proceedings, IX Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica, Oeiras, USIG. 2006
- TERRA T, SILVA J. Cenário de desmatamento da Bacia do Alto Paraguai (BAP) em 2022 e 2050; Anais 4º Simpósio de Geoecologias no Pantanal, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2012; 741 -749
- TEWOLDE MG, CABRAL P. Urban Sprawl Analysis and Modeling in Asmara, Eritrea. *Remote Sensing.* 2011 Sep 26;3(10):2148–65.
- THEOBALD DM, e HOBBS NT. Forecasting rural land-use change: a comparison of regression and spatial transition-based models. *Geographical and Environmental Modeling.* 1998 2165-82.
- TOBLER WR. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography.* 1970 Jun 1;46:234–40.
- TURNER MG. Spatial simulation of landscape changes in Georgia: A comparison of 3 transition models. *Landscape Ecol.* 1987 Jul 1;1(1):29–36.
- VERBURG PH, SCHULP CJE, WITTE N, VELDKAMP A. Downscaling of land use change scenarios to assess the dynamics of European landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 2006 May;114(1):39–56.
- VON NEUMANN J. Theory of Self-Reproducing Automata. Burks AW, editor. Champaign, IL, WALKER B, STEFFEN W, CANADELL J, INGRAM J. The Terrestrial Biosphere and Global Change: Implications for Natural and Managed Ecosystems. Synthesis Volume - IGBP
- WHITE R, ENGELEN G, ULJEE I, LAVALLE C, ERLICH D. Developing an Urban Land Use Simulator for European Cities. 2000. Available from: http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/referencias/RIKS_LandUse.pdf
- WHITE R, ENGELEN G. Cellular Automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, 1993 25, 1175-1199.

WOLFRAM S. Statistical mechanics of cellular automata [Internet]. Reviews of Modern Physics. 1983. 01–644 p. Available from: <http://www.stephenwolfram.com/publications/academic/statistical-mechanics-cellular-automata.pdf>

WU F, YEH A. Changing Spatial Distribution and Determinants of Land Development in Chinese Cities in the Transition from a Centrally Planned Economy to a Socialist Market Economy: A Case Study of Guangzhou. Urban Studies. 1997 Nov;34(11):1851–79.

XIONG X, GRUNWALD S, MYERS DB, ROSS CW, HARRIS WG, COMERFORD NB. Interaction effects of climate and land use/land cover change on soil organic carbon sequestration. Science of The Total Environment. 2014 Sep 15;493:974–82.

YANG X, ZHENG X-Q, LV L-N. A spatiotemporal model of land use change based on ant colony optimization, Markov chain and cellular automata. Ecological Modelling. 2012 May 24; 233:11–9.

YE B, BAI Z. Simulating Land Use/Cover Changes of Nenjiang County Based on CA-Markov Model. In: Li D, editor. Computer And Computing Technologies In Agriculture, Volume I [Internet]. Springer US; 2008 [cited 2014 Apr 2]. p. 321–9. Available from: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-77251-6_35

C&SIG
